TRAITÉ
THÉORIQUE ET PRATIQUE
DE LA RÉGULATION
ET
DE LA COMPENSATION
DES COMPAS

PARIS

TYPOGRAPHIE GEORGES CHAMEROT

19, RUE DES SAINTS-PÈRES, 19

PRÉFACE

En publiant cette seconde édition du Traité de régulation et de compensation des compas, je poursuis le but que je me suis proposé d'atteindre dès le début de mes travaux sur cette question, savoir : simplifier suffisamment une théorie délicate et complexe, connue seulement d'un petit nombre, pour la faire passer dans la pratique et mettre ainsi tout marin, capable de faire le point estimé, en état d'assurer tout à la fois la rapidité, l'économie et la sécurité de sa route.

Voici les résultats atteints par la première édition :

1° Une dépêche du ministre de la Marine, provoquée dans les premiers jours de l'année 1882 par M. le vice-amiral Peyron alors préfet maritime à Brest, a rendu réglementaire le calcul des cinq coefficients de la formule approchée des déviations, de telle sorte qu'il suffit aujourd'hui de deux observations de variation seulement, pour obtenir, en un lieu quelconque, les valeurs multiples d'une quantité qui varie avec chaque cap du bâtiment.

2° Sur la demande du directeur général du dépôt des cartes et plans de la marine et de M. le contre-amiral Mouchez, directeur de l'Observatoire de Paris, il a été institué, pour les officiers de la marine de l'État attachés à l'Observatoire de Montsouris, un cours où sont traitées toutes les questions relatives aux compas.

3° Depuis quelque temps c'est sous la direction de l'officier des montres de chaque bâtiment que sont faites, avant le départ, toutes les opérations qui concernent les compas, régulation ou compensation suivant les cas. Ces questions sont donc résolues aujourd'hui par ceux qui y sont directement intéressés, parce qu'elles ne leur demandent plus qu'un effort compatible avec les exigences et les fatigues du service à bord.

4° Enfin la thèse principale de mon livre a été adoptée successivement par tous ceux qui ont écrit depuis sur cette question.

On la jugeait cependant, en 1881, bien présomptueuse et bien hardie lorsqu'elle affirmait non pas seulement les avantages mais encore la nécessité de la compensation des Compas, objet jusqu'alors de préventions aussi unanimes que tenaces.

Dès 1882, M. le lieutenant de vaisseau Malapert, dans d'intéressantes études publiées par la *Revue maritime et coloniale,* mettait en relief les principes et les avantages de la nouvelle méthode. Cette année, MM. les lieutenants de vaisseau Rérolle et Bourdon, dans les excellents cours qu'ils ont faits, le premier à bord de la frégate école d'application l'*Iphigénie,* le second à l'école navale sur le *Borda,* ont donné pour la première fois (à ma connaissance du moins) à la compensation, dans l'enseignement de nos futurs officiers de marine, la place qu'elle méritait : ils leur éviteront ainsi une partie des ennuis et des mécomptes par lesquels nous avons passé.

Je dois les remercier ici tous les trois d'avoir bien voulu, en me citant, associer mon nom à ce progrès qu'ils font, comme moi, leurs efforts pour atteindre.

C'est en 1878 que sir William Thomson a imaginé la rose et le compas qui, réalisant les conditions multiples, parfois contradictoires, imposées par la théorie de Poisson, mises en relief par Archibald Smith et sir Georges Airy, ont fait faire un progrès très considérable à la navigation. Bien pénétré de l'importance d'une telle découverte je me demande comment elle a pu faire si peu de bruit : en effet, occupé par d'autres travaux je n'en ai eu connaissance qu'en 1880, et je m'étonne encore aujourd'hui qu'on m'ait laissé la bonne fortune et l'honneur d'être le premier à dire et à prouver que la question des compas était complètement et définitivement résolue, affirmation absolue que l'illustre inventeur n'avait pas voulu faire par un sentiment facile à comprendre.

Mais, depuis l'apparition de mon livre en 1881, un grand nombre de ceux qui avaient ignoré, méconnu ou nié ces progrès, les ont enfin acceptés. L'anonymat rigoureux qu'ils gardent souvent à mes humbles efforts m'a semblé parfois injuste autant qu'inexplicable : il a du moins cette heureuse conséquence de donner plus d'autorité aux méthodes que je préconise en communiquant à leurs adhésions ce caractère de spontanéité et d'indépendance qui en augmente toujours la valeur.

Encouragé par ces succès, par l'épuisement, relativement rapide, de la première édition d'un ouvrage aussi spécial, j'ai fait tous mes efforts pour que la seconde édition aide à réaliser encore quelques progrès et mérite, à son tour, d'être utilisée dans des travaux du même ordre.

J'ai mis à profit pour cela l'expérience que j'ai acquise dans les missions que m'ont successivement confiées MM. les vice-amiraux Jauréguiberry, Peyron et Galiber, quand ils étaient Ministres de la Marine, les observations que j'ai recueillies dans les ports, et celles qu'ont bien voulu me faire mes camarades MM. les lieutenants de vaisseau Decante, Rossel, Rérolle, Perrin, Gaschard et Baule, auxquels je renouvelle ici tous mes remerciements.

Suivant leurs conseils, j'ai développé tout ce qui a trait à la pratique de la compensation. Les autres additions sont le résultat de mon expérience personnelle; j'en dirai plus loin les motifs.

Il me sera permis tout d'abord de constater avec satisfaction que je n'ai pas eu un seul mot à changer aux conclusions que j'adoptais en 1881, ni une seule notion théorique ou une formule à ajouter.

A cette époque j'avais dû dégager ce que je jugeais indispensable d'une bibliographie considérable, aride, se répétant et se copiant fréquemment, sans avertissement préalable, sans autre originalité, souvent, que ce luxe de notations travesties ou étranges si pénibles pour le lecteur. — Cette partie théorique, que j'aurais voulu encore alléger, s'est du moins trouvée suffisante pour me permettre de poursuivre et d'étendre ma tâche.

Afin de ne pas donner aux lecteurs de la première édition la peine inutile de parcourir de nouveau le livre tout entier pour se rendre compte des additions, j'ai paginé celles-ci d'une façon spéciale. Persuadé que la compensation complète du compas s'impose, et qu'en hâtant son adoption exclusive, je rends un véritable service à la navigation, j'ai insisté dans chacune des parties du livre et toutes les fois que l'occasion s'est présentée, sur les avantages qu'on en peut retirer.

Mais sachant combien l'adoption d'un progrès quelconque est toujours lente, comprenant mieux la nécessité de tenir compte du matériel des anciens compas, j'ai indiqué et mis fortement en relief les moyens de les transformer à peu de frais pour en tirer un meilleur service.

Voici les résultats que je voudrais obtenir avec mon nouveau livre :

I. Avant tout et pour tous les compas quels qu'ils soient, faire adopter les observations de force directrice;

II. Pour tous les compas également, faire adopter la compensation de l'erreur due à la bande;

III. Pour les anciens compas, faire adopter :

a La régulation approximative;

b La compensation partielle;

c L'usage du dygogramme, c'est-à-dire de la courbe si facilement, si rapidement construite, qui donne, pour chaque cap, la force directrice et la déviation du compas;

IV. Pour les compas entièrement compensés faire adopter:

a La compensation approximative;

b L'emploi des deux instruments auxiliaires, imaginés par sir William Thomson, le déflecteur ajustable et l'aiguille d'inclinaison qui, permettant la compensation et le contrôle du compas sans l'aide d'un seul relèvement et sans aucun calcul, réalisent si complètement le souhait, longtemps et souvent formulé par les marins, de pouvoir assurer l'exactitude et la sécurité de leur route, dans les circonstances les plus défavorables et les plus critiques de la navigation, celles où le bâtiment est pris par la brume.

Les raisons qui militent en faveur de ces différentes innovations me paraissent probantes et bien qu'elles soient exposées dans l'ouvrage, avec tous les détails nécessaires, je désire les résumer ici pour ceux qui ne liraient que la préface et qui n'ont que faire du livre tout entier.

Les observations de la force directrice du compas sont absolument indispensables. C'est au manque presque absolu de ces observations dans notre marine qu'il faut imputer tous les mécomptes provenant de la paresse du compas, embardées durant le jour, erreurs de route pendant la nuit, mauvais ou périlleux atterrissages.

Actuellement, d'après un préjugé très généralement répandu, on croit pouvoir juger du plus ou moins bon fonctionnement du compas par la seule grandeur de ses déviations. C'est une erreur dangereuse. La petitesse des déviations est bien, à coup sûr, une des conditions essentielles du bon fonctionnement des compas, mais elle n'est pas la seule. Elle indique que la force directrice du compas, variable à chaque cap, fait des oscillations assez faibles autour de sa valeur moyenne, mais elle n'indique que cela, et ce n'est pas assez. Il faut encore que cette force moyenne ait une valeur convenable et on ne peut le savoir qu'en la déterminant, soit au moyen des oscillations de la rose, soit, mieux encore, au moyen d'une aiguille spéciale, soit, ce qui est préférable, au moyen du déflecteur.

Une seule observation suffit pour les compas entièrement compensés, quatre sont nécessaires pour les compas partiellement compensés, et il faut les faire aux huit caps principaux de la rose pour un compas non compensé.

Seules ces observations permettraient d'éviter les inconvénients dus à la paresse des compas de route et si souvent attribués à tort à l'inattention des hommes de barre ou au manque de surveillance des officiers de quart.

Elles indiqueraient en effet les caps où il est indispensable de naviguer en transmettant à la voix ou par signal les indications du compas étalon, et ceux auxquels on pourra se soustraire à cette gêne qui n'est pas toujours sans dangers.

On peut avoir aisément une idée approchée de l'importance des erreurs de route dues soit à la paresse du compas, soit à l'absence de relèvements. En les évaluant à dix heures de route perdues par mois pour tout bâtiment qui navigue, on les atténue certainement. Et une telle et si faible erreur, même pour un bâtiment à vapeur, de moyenne puissance,soit 1000 chevaux, représente, en comptant six mois de navigation par an, soixante tonnes de charbon, auxquelles il convient d'ajouter les frais de matière grasse, de service à la mer, d'amortissement, enfin les risques de mer augmentés par ces retards. On éviterait toutes ces dépenses et tous ces ennuis en exigeant que chaque constructeur, quand il livre un compas, inscrive sur la rose la durée d'oscillation dans un lieu donné, que tout officier des montres calcule, pour tous les compas du bord, non seulement les cinq coefficients, mais encore la force directrice moyenne du compas vers le Nord magnétique : Enfin tout officier de quart devrait faire, pour le compas de route, quand il n'est pas compensé et que le temps le permet, à chaque changement de cap, l'expérience d'oscillation qui donne le rapport de la force directrice du compas à la force horizontale terrestre prise pour unité dans la carte.

La correction de l'erreur due à la bande est également indispensable. Elle seule, à son tour, peut empêcher les erreurs de route quand le bâtiment est à la bande, et donner de la stabilité au compas quand les roulis amples ou vifs du bâtiment impriment à la rose ces lancés qui rendent la route difficile et souvent impossible à garder exactement. On pourrait à la rigueur, sur les grands bâtiments, se borner à déterminer et à tenir compte de cette erreur par les calculs, mais toute cette théorie est longue et délicate, tout calcul implique des chances d'erreur.

L'emploi du déflecteur et de l'aiguille d'inclinaison supprime tous ces inconvénients et deux minutes d'observation faites à terre, avant le départ, une fois pour toutes, deux autres minutes à bord dans le lieu pour lequel on veut faire la correction, permettent d'obtenir cette dernière.

Enfin chacun comprend aisément, et les marins plus que personne, l'intérêt qui s'attache à pouvoir se passer de tout relèvement pour la régulation, la compensation ou le contrôle des compas. Les marins ont longtemps et vivement réclamé une méthode à la fois pratique, facile et exacte, pour obtenir ce résultat. Ce progrès, l'un des plus importants que la navigation ait jamais obtenus, est réalisé aujourd'hui grâce à sir William Thomson. Aussi comprend-on difficilement pourquoi les marins l'adoptent si lentement et presque à contre-cœur. Leur défiance provient évidemment de l'opinion erronée qu'ils se font de la délicatesse des instruments et de la complexité des méthodes. Quelques heures cependant suffisent pour se rendre maître des uns et des autres. Cette question spéciale vient à la vérité de faire un grand pas.

A la fin d'une mission que j'avais remplie à Toulon dans l'été de 1885 pour les questions relatives aux compas, M. le vice-amiral baron Duperré, commandant en chef l'escadre d'évolutions, soucieux de hâter une solution d'une telle importance, voulut bien provoquer mon embarquement sur un des bâtiments placés sous ses ordres. Il fit plus encore, après m'avoir donné toutes les facilités de travail désirables, il encouragea dès le début mes efforts avec une bienveillance dont je demande la permission de lui témoigner ici toute ma gratitude. Je fus d'ailleurs cordialement aidé par mon camarade M. le lieutenant de vaisseau Massé, qui commandait alors un des torpilleurs attachés à l'escadre. Grâce à sa complaisance infatigable, à la notion si nette qu'il avait du résultat à atteindre, nos expériences purent être assez complètes pour que nos rapports aient mérité l'approbation de l'amiral, qui, appelé bientôt après à la présidence du Conseil des travaux, voulut bien là encore appuyer mes propositions de sa haute autorité.

Quelque temps après, M. le vice-amiral Aube, ministre de la Marine, ordonnait la mise en service d'un nombre relativement considérable de déflecteurs et d'aiguilles d'inclinaison. La pratique pourra donc se prononcer en toute connaissance de cause et je ne pense pas être trop présomptueux en espérant que, sur ce point encore, elle me donnera raison.

D'ailleurs en dehors de son principal et plus précieux emploi dans la compensation en temps de brume, le déflecteur a aussi d'autres avantages secondaires. Il accélère la correction de l'erreur due à la bande, il rend plus rapide la compensation approximative, enfin il permet de suivre et de calculer, en temps de brume, les déviations anormales du compas dont j'ai parlé avec détail dans le sommaire et dans la troisième partie de ce livre.

J'appelle également l'attention du lecteur sur les dangereuses erreurs de compas que peut provoquer un éclairage électrique mal conçu ou mal surveillé, et sur la méthode graphique pour calculer, dans un lieu donné, la table complète des déviations. Pendant l'impression de cet ouvrage, une note présentée à l'Académie des sciences par M. Lallemand, ingénieur au corps des Mines, exposa des applications étendues et nouvelles de la méthode de calcul graphique imaginée par M. Lalanne, inspecteur général des Ponts et Chaussées, membre de l'Institut. Cette méthode me parut être susceptible d'une heureuse application au calcul des déviations.

Après plusieurs essais M. Renard, chef de bureau de la commission du nivellement géodésique dont la compétence et l'habileté sont hors de pair pour les applications du calcul graphique, a dressé l'abaque que l'on trouvera à la fin de ce volume, et qui me semble assez simple pour remplacer les calculs numériques du tableau de la page 143. Dans tous les cas l'abaque dispense de la construction d'une table complète des déviations puisqu'il permet d'obtenir immédiatement la valeur de cette quantité correspondante à la route que l'on veut faire.

La nécessité de la vulgarisation rapide des méthodes qui permettent d'assurer à la navigation une rapidité et une sécurité plus grandes, s'impose chaque jour davantage, car chaque jour aussi la concurrence des nations civilisées pour s'assurer le bénéfice des transports maritimes devient plus âpre et plus cruelle.

La dimension des bâtiments, la puissance de leurs machines, leurs vitesses augmentent dans des proportions aussi rapides qu'inattendues. Toute erreur de route se paie plus cher et met celui qui la commet dans un état d'infériorité plus grand. Pour un de ces grands paquebots transocéaniques qui filent 15 nœuds en moyenne à l'heure avec une machine de 4,000 chevaux, une simple erreur de route de 1°, due à la paresse du compas, représente, en un jour, une perte de près d'une demi-heure et de deux tonnes de charbon. Et des erreurs plus considérables ne sont pas rares dans les parages les plus fréquentés par les paquebots les plus puissants, car la partie septentrionale de l'océan Atlantique est fréquemment envahie par des brumes pendant plus de la moitié de l'année.

Et ce n'est là, malgré son importance, que le plus petit côté de la question; la nécessité de gagner ses adversaires de vitesse impose au navire venant du large l'attaque immédiate de la terre dans les circonstances les plus défavorables, même en temps de brume, et de tels atterrissages ne peuvent, ne doivent se tenter qu'avec des compas dont on soit parfaitement sûr.

Les statistiques très détaillées du *Board of Trade*, publiées sous l'habile direction de M. R. Giffen, montrent que dans la seule année 1883, les échouages dûs, on le sait, la plupart du temps, aux erreurs de route, ont entraîné la perte totale de 745 bâtiments à voiles et 129 bâtiments à vapeur valant environ les premiers 67 millions, les seconds 78 millions, soit ensemble 145 millions. De plus, 691 voiliers et 307 vapeurs ont fait des avaries plus ou moins graves provenant de la même cause. Enfin ce qui est bien autrement regrettable, pour la seule marine anglaise le nombre des vies humaines perdues dans ces sinistres monte à 350 pour les navires à voiles, à 382 pour les navires à vapeur. De telle sorte qu'en admettant la même proportion pour les autres nations civilisées, on arrive à un chiffre approximatif et plutôt trop faible de 2000 morts annuelles, dont une grande partie, à coup sûr, pourraient être sauvées par une prévoyance un peu plus attentive et les prescriptions très simples que je propose.

Les navires de guerre, eux aussi, n'échappent pas à la rigueur des lois économiques qui régissent la marine marchande.

La source de leur puissance militaire est, en définitive, leur approvisionnement de charbon. L'économie du combustible s'impose donc en temps de paix pour alléger le budget ou pour augmenter l'importance des constructions neuves, et en temps de guerre par la nécessité suprême de prolonger les croisières en ménageant les ressources des dépôts de charbon, facteurs importants de la durée et l'issue de la lutte.

Simplifier les méthodes d'observation du compas tout en les rendant plus rigoureuses ; mettre ainsi, pour la première fois, à portée de tous les marins, au prix d'un léger effort, une théorie que l'on jugeait si difficile que personne n'avait encore voulu prendre la peine de l'exposer intégralement et d'une façon élémentaire;

Restreindre par là, d'abord les retards et les dépenses qui précèdent le départ de bâtiments, puis les erreurs de route, le nombre des naufrages et par suite les frais de navigation et d'assurance; indiquer aux armateurs, par ces économies possibles, le moyen de réaliser des ressources considérables qui aideront notre marine de commerce, seul fondement de notre marine militaire, à sortir de l'état de langueur dont elle se plaint;

Avant tout, prévenir ou diminuer s'il se peut les pertes, si cruelles, de matériel et d'hommes engloutis dans les échouages, tel est le but multiple que j'ai eu constamment devant les yeux et qui m'a soutenu dans mes efforts.

Est-ce erreur ou présomption de penser que cet ouvrage et ceux qui l'ont précédé peuvent rendre quelque service à la prospérité de notre flotte marchande, à la puissance de notre marine militaire?

J'ai été parfois tenté de le croire et de laisser là les études commencées lorsque des voix autorisées, qui voulaient bien louer mes travaux, regrettaient de ne pouvoir donner une sanction immédiate à ces éloges par la seule raison que ces études ne leur semblaient pas intéresser la pratique de la navigation d'une façon assez directe et assez importante.

L'emploi de plus en plus général de la formule approchée de la déviation et des méthodes de compensation, la place qu'elles ont prise dans les publications et surtout dans l'enseignement depuis 1882, enfin de nombreux témoignages d'intérêt reçus, pour la plupart, de marins que je n'ai jamais vus, en me donnant des preuves irrécusables de l'utilité immédiate et réelle de mes travaux m'ont encouragé à persévérer.

Je ne crois pas pouvoir attacher un trop haut prix à ces sympathies que je me suis efforcé de mériter et j'exprime ici toute ma reconnaissance à ceux qui ont bien voulu me les accorder. Cette seconde édition ne leur paraîtra peut-être pas indigne de leur approbation; elle fera faire à la pratique, je l'espère du moins fermement, un nouveau pas en avant, et me permettra de réaliser ainsi plus complètement mon vœu le plus ardent : celui d'éviter des morts stériles à cette grande famille de marins à laquelle je suis fier d'appartenir.

A. COLLET.

1er août 1886.

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

Pour un ouvrage tel que celui-ci, il ne saurait être inutile que l'auteur donne quelques indications sur la manière de lire son livre qu'il croit la meilleure si on veut en tirer tout le parti possible.

Si le lecteur n'a jamais eu encore l'occasion de s'occuper de cette question, ou qu'il se soit jusqu'ici laissé rebuter par sa complication, il ne faudra pas qu'il s'étonne de trouver sur sa route quelques difficultés qui tiendront les unes à la nouveauté qu'aura pour lui la question traitée, les autres au sujet même, les dernières enfin à l'auteur du livre.

Si donc le lecteur voulait me permettre de lui donner un conseil, je lui dirais de lire attentivement et successivement l'introduction, la première partie, en sautant d'abord ce qui regarde la déviation due à la bande de la page 83 à la page 86, la deuxième partie, enfin de passer la troisième partie pour arriver de suite à la quatrième, qui terminerait cette première lecture, suffisante pour donner un aperçu d'ensemble et laisser à l'esprit le temps de se mettre, pour ainsi dire, au point.

Dans cette première lecture, on ne devra jamais se buter sur une difficulté quelconque : si un quart d'heure de réflexion n'a pas suffi pour la résoudre, on passera outre, et, à coup sûr, fréquemment on aura à s'étonner de la sentir inopinément résolue par le seul effet de l'application assidue de l'esprit à un même sujet. Cette première lecture terminée, si on ne veut pas en perdre rapidement le résultat, il faudra en faire une seconde, mais cette fois sans rien passer. Je ne crains pas d'affirmer que ce travail suffira pour se rendre absolument maître de cette question, qui aujourd'hui effraie et rebute si fréquemment ceux qui ont intérêt à la connaître.

Je prie instamment tous ceux des lecteurs qui, à cette seconde lecture, auraient trouvé une difficulté, insoluble après un quart d'heure de travail, de m'écrire, chez l'éditeur de ce livre, un mot pour m'indiquer où se trouve cette difficulté, en me donnant les détails nécessaires pour me permettre de bien comprendre ce qui les arrête.

Enfin, il se peut très bien qu'un capitaine ou un officier inopinément chargé de la responsabilité des compas, demande à ce livre, qu'il n'aurait pas même le temps de parcourir en entier, de lui donner de suite des notions pratiques suffisantes pour lui permettre de se servir du compas de Sir W. Thomson. Dans ce cas, il faudrait lire seulement la première

partie, toujours en sautant ce que nous avons indiqué, et passer de suite à la quatrième. Il ne faudrait recourir à l'introduction que dans les cas où les souvenirs d'école feraient absolument défaut, et à la seconde partie qu'au moment de faire le calcul des coefficients très faibles qui peuvent rester après la compensation.

Nous n'ajoutons qu'un mot. Il est impossible que le travail d'un seul, si persévérant et si consciencieux qu'il soit, puisse se rendre maître des multiples aspects d'une question aussi vaste et aussi délicate, et nous en donnons de suite un exemple.

Pour ne parler que d'un seul des problèmes dont la solution intéresse la pratique des observations conseillées dans cet ouvrage, je regrette de ne pas pouvoir publier un tableau vraiment complet des valeurs des coefficients et paramètres de la déviation à bord des navires de différents types. Je suis réduit à publier les seuls renseignements réunis, il y a quinze ans environ, par MM. Archibald Smith et le captain F.-J. Evans, et publiés par les ordres de l'Amirauté anglaise. Si on avait les valeurs de ces coefficients pour le vingtième seulement des navires en fer de différents types qui sillonnent aujourd'hui les mers, on pourrait en une demi-heure et avec des observations faites à un seul cap, compenser ses compas avec une exactitude suffisante pour permettre d'attendre, avec sécurité, la possibilité de nouvelles observations.

En demandant de nouveau et très instamment à mes lecteurs de vouloir bien me signaler toutes les obscurités, toutes les lacunes qu'ils trouveront dans cet ouvrage, je ne puis que les prier de m'envoyer tous les documents et toutes les données qu'ils jugent lui faire défaut. Je m'engage à les coordonner, à les résumer, enfin à les publier avec le nom de celui qui aura bien voulu se donner la peine de les rassembler et de me les communiquer. Je crois qu'en opérant ainsi, on peut en finir rapidement et complètement avec cette question; le nombre de celles que l'activité et la persévérance humaines devront encore résoudre sera toujours assez considérable.

Sommaire du Livre. — Voici le résumé des notions les plus indispensables contenues dans ce livre. Il suffira de se reporter à la table des matières pour trouver sans peine l'endroit où chaque point particulier est traité en détail. Il est essentiel de ne pas oublier que la correction de l'erreur due à la bande est indispensable, surtout à bord des bâtiments qui ont des roulis vifs ou amples. Si la théorie de cette erreur présente quelques difficultés, on se convaincra aisément qu'on peut, sans les avoir résolues, appliquer les règles pratiques très simples qui permettent d'en corriger la plus grande partie, en moins de cinq minutes, quand on emploie la balance d'inclinaison.

Il est bon d'arrêter l'emplacement du compas avant la construction du navire. Le devis d'armement doit mentionner le cap de construction du bâtiment.

Pendant l'armement, il faut, autant que possible, changer cap pour cap l'orientation que le bâtiment avait pendant sa construction.

On ne doit jamais faire la régulation ou la compensation des compas aussitôt après que le bâtiment a quitté un cap gardé pendant plusieurs jours dans le port ou en rade.

On doit profiter de la sortie du bâtiment pour essais de machines : 1° pour lui faire décrire des tours entiers d'horizon en sens alternatifs; 2° pour faire ensuite une régulation ou une compensation approximative, soit par les relèvements, soit mieux par le déflecteur.

Dans tous les cas, on doit faire l'une ou l'autre de ces deux opérations, en rade, en mettant à profit les évitages, et avant d'aller sur les coffres.

Formule simplifiée de la déviation.

Régulation d'un compas non compensé. — Observer la déviation aux seize ou tout au moins aux huit caps principaux du compas.

Observer la force directrice aux huit caps principaux.

Corriger l'erreur due à la bande.

Faire la courbe des déviations et celle des forces directrices.

Calculer les cinq coefficients A, D, E, B et C.

Calculer le coefficient λ.

Construire le dygogramme qui donne les caps où le compas sera le moins sensible.

Compas compensé partiellement (au moyen d'aimants seulement).

Placer les aimants correcteurs.

Puis opérer, comme il est dit dans le paragraphe précédent, en se bornant à observer aux huit caps principaux.

Compas compensé entièrement. — Après avoir placé les aimants puis les sphères au cap Ouest ou Est, faire la compensation pour l'erreur due à la bande.

Après la compensation définitive, observer la déviation à chaque cap d'évitage, en profiter pour rectifier au besoin la position des compensateurs, et pour obtenir les valeurs très faibles laissées, après la compensation, aux cinq coefficients.

Mettre en place la barre de Flinders dès qu'on traversera l'équateur magnétique ou qu'on aura les données nécessaires.

Contrôle à la mer. — *Pour un compas non compensé*, déterminer de temps à autre les valeurs des deux coefficients variables B et C, au moyen de deux observations de déviation à deux caps cardinaux adjacents.

Avec ces valeurs et au moyen du tableau 143, ou mieux de l'abaque hexagonal donné à la fin du volume, on déterminera la table complète des déviations pour le lieu où l'on a observé B et C.

La valeur connue de λ permettra de construire le dygogramme et de savoir à quel cap on peut craindre la paresse du compas.

Pour un compas compensé partiellement ou entièrement et non muni de Flinders, vérifier fréquemment la position des aimants, surtout celle des aimants longitudinaux, la rectifier s'il y a lieu.

Pour un compas compensé entièrement et muni de Flinders, la vérification peut être beaucoup moins fréquente et montre, en général, qu'il n'y a pas lieu de changer la position des correcteurs. Il faut se garder de toucher à ceux-ci pour annuler les déviations anormales.

Des déviations anormales. — Quand le bâtiment suit pendant plusieurs

partie, toujours en sautant ce que nous avons indiqué, et passer de suite à la quatrième. Il ne faudrait recourir à l'introduction que dans les cas où les souvenirs d'école feraient absolument défaut, et à la seconde partie qu'au moment de faire le calcul des coefficients très faibles qui peuvent rester après la compensation.

Nous n'ajoutons qu'un mot. Il est impossible que le travail d'un seul, si persévérant et si consciencieux qu'il soit, puisse se rendre maître des multiples aspects d'une question aussi vaste et aussi délicate, et nous en donnons de suite un exemple.

Pour ne parler que d'un seul des problèmes dont la solution intéresse la pratique des observations conseillées dans cet ouvrage, je regrette de ne pas pouvoir publier un tableau vraiment complet des valeurs des coefficients et paramètres de la déviation à bord des navires de différents types. Je suis réduit à publier les seuls renseignements réunis, il y a quinze ans environ, par MM. Archibald Smith et le captain F.-J. Evans, et publiés par les ordres de l'Amirauté anglaise. Si on avait les valeurs de ces coefficients pour le vingtième seulement des navires en fer de différents types qui sillonnent aujourd'hui les mers, on pourrait en une demi-heure et avec des observations faites à un seul cap, compenser ses compas avec une exactitude suffisante pour permettre d'attendre, avec sécurité, la possibilité de nouvelles observations.

En demandant de nouveau et très instamment à mes lecteurs de vouloir bien me signaler toutes les obscurités, toutes les lacunes qu'ils trouveront dans cet ouvrage, je ne puis que les prier de m'envoyer tous les documents et toutes les données qu'ils jugent lui faire défaut. Je m'engage à les coordonner, à les résumer, enfin à les publier avec le nom de celui qui aura bien voulu se donner la peine de les rassembler et de me les communiquer. Je crois qu'en opérant ainsi, on peut en finir rapidement et complètement avec cette question; le nombre de celles que l'activité et la persévérance humaines devront encore résoudre sera toujours assez considérable.

Sommaire du Livre. — Voici le résumé des notions les plus indispensables contenues dans ce livre. Il suffira de se reporter à la table des matières pour trouver sans peine l'endroit où chaque point particulier est traité en détail. Il est essentiel de ne pas oublier que la correction de l'erreur due à la bande est indispensable, surtout à bord des bâtiments qui ont des roulis vifs ou amples. Si la théorie de cette erreur présente quelques difficultés, on se convaincra aisément qu'on peut, sans les avoir résolues, appliquer les règles pratiques très simples qui permettent d'en corriger la plus grande partie, en moins de cinq minutes, quand on emploie la balance d'inclinaison.

Il est bon d'arrêter l'emplacement du compas avant la construction du navire. Le devis d'armement doit mentionner le cap de construction du bâtiment.

Pendant l'armement, il faut, autant que possible, changer cap pour cap l'orientation que le bâtiment avait pendant sa construction.

On ne doit jamais faire la régulation ou la compensation des compas aussitôt après que le bâtiment a quitté un cap gardé pendant plusieurs jours dans le port ou en rade.

On doit profiter de la sortie du bâtiment pour essais de machines : 1° pour lui faire décrire des tours entiers d'horizon en sens alternatifs; 2° pour faire ensuite une régulation ou une compensation approximative, soit par les relèvements, soit mieux par le déflecteur.

Dans tous les cas, on doit faire l'une ou l'autre de ces deux opérations, en rade, en mettant à profit les évitages, et avant d'aller sur les coffres.

Formule simplifiée de la déviation.

Régulation d'un compas non compensé. — Observer la déviation aux seize ou tout au moins aux huit caps principaux du compas.

Observer la force directrice aux huit caps principaux.

Corriger l'erreur due à la bande.

Faire la courbe des déviations et celle des forces directrices.

Calculer les cinq coefficients A, D, E, B et C.

Calculer le coefficient λ.

Construire le dygogramme qui donne les caps où le compas sera le moins sensible.

Compas compensé partiellement (au moyen d'aimants seulement).

Placer les aimants correcteurs.

Puis opérer, comme il est dit dans le paragraphe précédent, en se bornant à observer aux huit caps principaux.

Compas compensé entièrement. — Après avoir placé les aimants puis les sphères au cap Ouest ou Est, faire la compensation pour l'erreur due à la bande.

Après la compensation définitive, observer la déviation à chaque cap d'évitage, en profiter pour rectifier au besoin la position des compensateurs, et pour obtenir les valeurs très faibles laissées, après la compensation, aux cinq coefficients.

Mettre en place la barre de Flinders dès qu'on traversera l'équateur magnétique ou qu'on aura les données nécessaires.

Contrôle à la mer. — *Pour un compas non compensé*, déterminer de temps à autre les valeurs des deux coefficients variables B et C, au moyen de deux observations de déviation à deux caps cardinaux adjacents.

Avec ces valeurs et au moyen du tableau 143, ou mieux de l'abaque hexagonal donné à la fin du volume, on déterminera la table complète des déviations pour le lieu où l'on a observé B et C.

La valeur connue de λ permettra de construire le dygogramme et de savoir à quel cap on peut craindre la paresse du compas.

Pour un compas compensé partiellement ou entièrement et non muni de Flinders, vérifier fréquemment la position des aimants, surtout celle des aimants longitudinaux, la rectifier s'il y a lieu.

Pour un compas compensé entièrement et muni de Flinders, la vérification peut être beaucoup moins fréquente et montre, en général, qu'il n'y a pas lieu de changer la position des correcteurs. Il faut se garder de toucher à ceux-ci pour annuler les déviations anormales.

Des déviations anormales. — Quand le bâtiment suit pendant plusieurs

partie, toujours en sautant ce que nous avons indiqué, et passer de suite à la quatrième. Il ne faudrait recourir à l'introduction que dans les cas où les souvenirs d'école feraient absolument défaut, et à la seconde partie qu'au moment de faire le calcul des coefficients très faibles qui peuvent rester après la compensation.

Nous n'ajoutons qu'un mot. Il est impossible que le travail d'un seul, si persévérant et si consciencieux qu'il soit, puisse se rendre maître des multiples aspects d'une question aussi vaste et aussi délicate, et nous en donnons de suite un exemple.

Pour ne parler que d'un seul des problèmes dont la solution intéresse la pratique des observations conseillées dans cet ouvrage, je regrette de ne pas pouvoir publier un tableau vraiment complet des valeurs des coefficients et paramètres de la déviation à bord des navires de différents types. Je suis réduit à publier les seuls renseignements réunis, il y a quinze ans environ, par MM. Archibald Smith et le captain F.-J. Evans, et publiés par les ordres de l'Amirauté anglaise. Si on avait les valeurs de ces coefficients pour le vingtième seulement des navires en fer de différents types qui sillonnent aujourd'hui les mers, on pourrait en une demi-heure et avec des observations faites à un seul cap, compenser ses compas avec une exactitude suffisante pour permettre d'attendre, avec sécurité, la possibilité de nouvelles observations.

En demandant de nouveau et très instamment à mes lecteurs de vouloir bien me signaler toutes les obscurités, toutes les lacunes qu'ils trouveront dans cet ouvrage, je ne puis que les prier de m'envoyer tous les documents et toutes les données qu'ils jugent lui faire défaut. Je m'engage à les coordonner, à les résumer, enfin à les publier avec le nom de celui qui aura bien voulu se donner la peine de les rassembler et de me les communiquer. Je crois qu'en opérant ainsi, on peut en finir rapidement et complètement avec cette question; le nombre de celles que l'activité et la persévérance humaines devront encore résoudre sera toujours assez considérable.

Sommaire du Livre. — Voici le résumé des notions les plus indispensables contenues dans ce livre. Il suffira de se reporter à la table des matières pour trouver sans peine l'endroit où chaque point particulier est traité en détail. Il est essentiel de ne pas oublier que la correction de l'erreur due à la bande est indispensable, surtout à bord des bâtiments qui ont des roulis vifs ou amples. Si la théorie de cette erreur présente quelques difficultés, on se convaincra aisément qu'on peut, sans les avoir résolues, appliquer les règles pratiques très simples qui permettent d'en corriger la plus grande partie, en moins de cinq minutes, quand on emploie la balance d'inclinaison.

Il est bon d'arrêter l'emplacement du compas avant la construction du navire. Le devis d'armement doit mentionner le cap de construction du bâtiment.

Pendant l'armement, il faut, autant que possible, changer cap pour cap l'orientation que le bâtiment avait pendant sa construction.

On ne doit jamais faire la régulation ou la compensation des compas aussitôt après que le bâtiment a quitté un cap gardé pendant plusieurs jours dans le port ou en rade.

On doit profiter de la sortie du bâtiment pour essais de machines : 1° pour lui faire décrire des tours entiers d'horizon en sens alternatifs; 2° pour faire ensuite une régulation ou une compensation approximative, soit par les relèvements, soit mieux par le déflecteur.

Dans tous les cas, on doit faire l'une ou l'autre de ces deux opérations, en rade, en mettant à profit les évitages, et avant d'aller sur les coffres.

Formule simplifiée de la déviation.

Régulation d'un compas non compensé. —Observer la déviation aux seize ou tout au moins aux huit caps principaux du compas.

Observer la force directrice aux huit caps principaux.

Corriger l'erreur due à la bande.

Faire la courbe des déviations et celle des forces directrices.

Calculer les cinq coefficients A, D, E, B et C.

Calculer le coefficient λ.

Construire le dygogramme qui donne les caps où le compas sera le moins sensible.

Compas compensé partiellement (au moyen d'aimants seulement).

Placer les aimants correcteurs.

Puis opérer, comme il est dit dans le paragraphe précédent, en se bornant à observer aux huit caps principaux.

Compas compensé entièrement. — Après avoir placé les aimants puis les sphères au cap Ouest ou Est, faire la compensation pour l'erreur due à la bande.

Après la compensation définitive, observer la déviation à chaque cap d'évitage, en profiter pour rectifier au besoin la position des compensateurs, et pour obtenir les valeurs très faibles laissées, après la compensation, aux cinq coefficients.

Mettre en place la barre de Flinders dès qu'on traversera l'équateur magnétique ou qu'on aura les données nécessaires.

Contrôle à la mer. — *Pour un compas non compensé*, déterminer de temps à autre les valeurs des deux coefficients variables B et C, au moyen de deux observations de déviation à deux caps cardinaux adjacents.

Avec ces valeurs et au moyen du tableau 143, ou mieux de l'abaque hexagonal donné à la fin du volume, on déterminera la table complète des déviations pour le lieu où l'on a observé B et C.

La valeur connue de λ permettra de construire le dygogramme et de savoir à quel cap on peut craindre la paresse du compas.

Pour un compas compensé partiellement ou entièrement et non muni de Flinders, vérifier fréquemment la position des aimants, surtout celle des aimants longitudinaux, la rectifier s'il y a lieu.

Pour un compas compensé entièrement et muni de Flinders, la vérification peut être beaucoup moins fréquente et montre, en général, qu'il n'y a pas lieu de changer la position des correcteurs. Il faut se garder de toucher à ceux-ci pour annuler les déviations anormales.

Des déviations anormales. — Quand le bâtiment suit pendant plusieurs

partie, toujours en sautant ce que nous avons indiqué, et passer de suite à la quatrième. Il ne faudrait recourir à l'introduction que dans les cas où les souvenirs d'école feraient absolument défaut, et à la seconde partie qu'au moment de faire le calcul des coefficients très faibles qui peuvent rester après la compensation.

Nous n'ajoutons qu'un mot. Il est impossible que le travail d'un seul, si persévérant et si consciencieux qu'il soit, puisse se rendre maître des multiples aspects d'une question aussi vaste et aussi délicate, et nous en donnons de suite un exemple.

Pour ne parler que d'un seul des problèmes dont la solution intéresse la pratique des observations conseillées dans cet ouvrage, je regrette de ne pas pouvoir publier un tableau vraiment complet des valeurs des coefficients et paramètres de la déviation à bord des navires de différents types. Je suis réduit à publier les seuls renseignements réunis, il y a quinze ans environ, par MM. Archibald Smith et le captain F.-J. Evans, et publiés par les ordres de l'Amirauté anglaise. Si on avait les valeurs de ces coefficients pour le vingtième seulement des navires en fer de différents types qui sillonnent aujourd'hui les mers, on pourrait en une demi-heure et avec des observations faites à un seul cap, compenser ses compas avec une exactitude suffisante pour permettre d'attendre, avec sécurité, la possibilité de nouvelles observations.

En demandant de nouveau et très instamment à mes lecteurs de vouloir bien me signaler toutes les obscurités, toutes les lacunes qu'ils trouveront dans cet ouvrage, je ne puis que les prier de m'envoyer tous les documents et toutes les données qu'ils jugent lui faire défaut. Je m'engage à les coordonner, à les résumer, enfin à les publier avec le nom de celui qui aura bien voulu se donner la peine de les rassembler et de me les communiquer. Je crois qu'en opérant ainsi, on peut en finir rapidement et complètement avec cette question; le nombre de celles que l'activité et la persévérance humaines devront encore résoudre sera toujours assez considérable.

Sommaire du Livre. — Voici le résumé des notions les plus indispensables contenues dans ce livre. Il suffira de se reporter à la table des matières pour trouver sans peine l'endroit où chaque point particulier est traité en détail. Il est essentiel de ne pas oublier que la correction de l'erreur due à la bande est indispensable, surtout à bord des bâtiments qui ont des roulis vifs ou amples. Si la théorie de cette erreur présente quelques difficultés, on se convaincra aisément qu'on peut, sans les avoir résolues, appliquer les règles pratiques très simples qui permettent d'en corriger la plus grande partie, en moins de cinq minutes, quand on emploie la balance d'inclinaison.

Il est bon d'arrêter l'emplacement du compas avant la construction du navire. Le devis d'armement doit mentionner le cap de construction du bâtiment.

Pendant l'armement, il faut, autant que possible, changer cap pour cap l'orientation que le bâtiment avait pendant sa construction.

On ne doit jamais faire la régulation ou la compensation des compas aussitôt après que le bâtiment a quitté un cap gardé pendant plusieurs jours dans le port ou en rade.

On doit profiter de la sortie du bâtiment pour essais de machines : 1° pour lui faire décrire des tours entiers d'horizon en sens alternatifs; 2° pour faire ensuite une régulation ou une compensation approximative, soit par les relèvements, soit mieux par le déflecteur.

Dans tous les cas, on doit faire l'une ou l'autre de ces deux opérations, en rade, en mettant à profit les évitages, et avant d'aller sur les coffres.

Formule simplifiée de la déviation.

Régulation d'un compas non compensé. — Observer la déviation aux seize ou tout au moins aux huit caps principaux du compas.

Observer la force directrice aux huit caps principaux.

Corriger l'erreur due à la bande.

Faire la courbe des déviations et celle des forces directrices.

Calculer les cinq coefficients A, D, E, B et C.

Calculer le coefficient λ.

Construire le dygogramme qui donne les caps où le compas sera le moins sensible.

Compas compensé partiellement (au moyen d'aimants seulement).

Placer les aimants correcteurs.

Puis opérer, comme il est dit dans le paragraphe précédent, en se bornant à observer aux huit caps principaux.

Compas compensé entièrement. — Après avoir placé les aimants puis les sphères au cap Ouest ou Est, faire la compensation pour l'erreur due à la bande.

Après la compensation définitive, observer la déviation à chaque cap d'évitage, en profiter pour rectifier au besoin la position des compensateurs, et pour obtenir les valeurs très faibles laissées, après la compensation, aux cinq coefficients.

Mettre en place la barre de Flinders dès qu'on traversera l'équateur magnétique ou qu'on aura les données nécessaires.

Contrôle à la mer. — *Pour un compas non compensé*, déterminer de temps à autre les valeurs des deux coefficients variables B et C, au moyen de deux observations de déviation à deux caps cardinaux adjacents.

Avec ces valeurs et au moyen du tableau 143, ou mieux de l'abaque hexagonal donné à la fin du volume, on déterminera la table complète des déviations pour le lieu où l'on a observé B et C.

La valeur connue de λ permettra de construire le dygogramme et de savoir à quel cap on peut craindre la paresse du compas.

Pour un compas compensé partiellement ou entièrement et non muni de Flinders, vérifier fréquemment la position des aimants, surtout celle des aimants longitudinaux, la rectifier s'il y a lieu.

Pour un compas compensé entièrement et muni de Flinders, la vérification peut être beaucoup moins fréquente et montre, en général, qu'il n'y a pas lieu de changer la position des correcteurs. Il faut se garder de toucher à ceux-ci pour annuler les déviations anormales.

Des déviations anormales. — Quand le bâtiment suit pendant plusieurs

jours une même route, il se manifeste presque toujours une déviation anormale, dont le signe peut être prévu en général, mais dont la grandeur ne saurait l'être si elle n'a pas été déterminée directement par l'observation dans des circonstances analogues. Toutes les fois qu'un bâtiment suit la même route, il faudra donc noter de quart en quart, si on le peut, la valeur observée de la déviation et en même temps la lecture correspondante du déflecteur.

Avec chaque valeur de la déviation, on notera : 1° la route suivie ; 2° l'heure et l'endroit de l'observation ; 3° l'allure de la machine. Il serait bon, dans les pays tropicaux, de déterminer également la température différente des deux bords du bâtiment pendant le jour.

Dans tous les cas, les premiers éléments indiqués permettront de déterminer la valeur des déviations anormales qu'on peut s'attendre à voir apparaître sur une route donnée après un temps donné. On aura ainsi la valeur des *coefficients de route*, dont la valeur peut varier dans des limites assez étendues suivant la capacité inductive du fer du navire pour le magnétisme qui est toujours inconnue.

Ces déviations anormales peuvent atteindre 3 et 4° pour les compas bien placés, mais elles peuvent dépasser ces valeurs pour des compas mal placés, ou pour un bâtiment dont le fer ou l'acier aurait des propriétés magnétiques particulières.

Il y a lieu également de craindre une déviation anormale quand le bâtiment change de cap, après avoir suivi pendant plusieurs jours la même route.

On trouvera, à la fin de la troisième partie, les moyens de déterminer et de calculer, à priori, les déviations anormales dont les effets sont très complexes, puisque celles qui sont dues à la route antérieure disparaissent successivement tandis qu'augmentent celles qui proviennent de la route actuellement faite. L'observation répétée de la variation et de la lecture d'écart normal peuvent donc seules donner la loi et les valeurs de ces déviations : il est donc préférable et même essentiel de toujours chercher à annuler les déviations anormales ou à les rendre aussi petites que possible par un meilleur choix pour la place des compas.

Compensation approximative.

Maintenant que tout préjugé contre la compensation a disparu, on peut, sans risquer de faire rejeter cette nouvelle méthode, si avantageuse à tous les points de vue, bien insister sur son principe et la cause des tâtonnements nécessaires dans certains cas particuliers.

Le but essentiel de la compensation c'est de rendre constante en grandeur et en direction (ou à très peu près), à tous les caps, la force directrice qui oriente le compas, dès que ce résultat est atteint, la déviation est annulée (ou à très peu près).

Or, l'expérience a prouvé que la force directrice moyenne, λ, à bord de la très grande majorité des bâtiments a pour valeur soit 0,900 soit une quantité qui ne diffère de celle-ci que de quatre à cinq centièmes au plus, soit par excès soit par différence.

On voit donc pourquoi il vaut mieux faire la compensation approximative avec le déflecteur qu'en corrigeant seulement les déviations avec les aimants.

En effet, avec le déflecteur, on place de suite les correcteurs de façon à obtenir l'écart normal au cap où on les met, avec la lecture correspondante aux 0,900 de la force qui produit le même écart à terre. De la sorte, quand on opérera la compensation définitive, on n'aura plus à corriger que les très faibles oscillations de force directrice, indiquées plus haut et un seul tour d'horizon suffira pour obtenir une compensation très exacte.

Au contraire, quand on se borne à annuler ou à très peu près la déviation observée à un cap avec le correcteur correspondant, si à ce cap la force directrice est exceptionnellement faible, 0,7 par exemple, le correcteur ainsi placé devra être notablement rapproché, si après la mise en place des autres correcteurs la force directrice à ce même cap est devenue 0,90 par exemple. Ceci suffit pour bien mettre en évidence un des avantages du déflecteur que je me reproche de n'avoir pas mis assez en relief dans le livre.

Quand on corrige au moyen des relèvements c'est-à-dire en annulant les déviations, les numéros des logements où l'on met les aimants correcteurs, ou la distance à laquelle on place deux sphères données, pour annuler une déviation donnée, indiquent d'ailleurs par eux-mêmes si les variations de la force directrice sont considérables et si on sera obligé de changer notablement la place des compensateurs. En effet, si ceux-ci corrigent une déviation notablement supérieure ou inférieure à celle qui est indiquée, pour les aimants par la graduation, pour les sphères par le tableau, c'est que la force directrice au cap indiqué est très différente en moins ou en plus de la valeur moyenne de λ, et dès lors la mise en place successive des correcteurs nécessitera le déplacement de ceux qui ont été mis auparavant et un déplacement d'autant plus grand que l'opération qui les concerne aura été faite plus près du début des opérations.

Ce qui précède explique : 1° l'utilité des aimants de faible diamètre pour corriger les faibles erreurs laissées par la première compensation, 2° la nécessité de calculer les cinq coefficients pour faire une compensation tout-à-fait exacte, 3° l'avantage que l'on trouvera dans la très grande majorité des cas, à placer *a priori* et avant toute observation des sphères compensatrices de façon à corriger un D de $+ 2°$ puisqu'on réduit par cela même les oscillations de la force directrice, tout en rapprochant la valeur de la moyenne de cette force de la valeur qu'elle doit avoir après la compensation.

Mais après avoir mis en relief les causes des tâtonnements nécessaires dans certains cas, il faut insister sur ce que, dans la très grande majorité des cas, un seul tour d'horizon suffit à ramener les déviations à ne jamais dépasser 3° à aucun cap.

Conclusion. — Les compas entièrement compensés et munis du Flinders doivent être employés de préférence à tous autres. Ils permettent la correction aisée et rapide de l'erreur due à la bande au moyen de la balance d'inclinaison. Leur plus précieux avantage c'est de permettre la compensation et le contrôle du compas par temps de brume. On tirerait un meilleur service du matériel de compas actuellement existant, en lui apportant des modifications légères et peu coûteuses, qui permettraient de les compenser partiellement et de corriger l'erreur due à la bande.

La détermination de λ est indispensable pour tous les compas quels qu'ils soient. Pour les compas non compensés, il faut observer la force directrice aux huit caps principaux de la rose et construire le dygogramme.

Cartes magnétiques et feuilles signalétiques.

Pour diminuer les erreurs de route, avoir des éléments certains pour le choix du compas, régler ou compenser ce compas exactement et rapidement, tirer parti des observations faites dans toutes les régions du globe par les officiers des montres qui suivent attentivement leurs compas, il faudrait prendre les deux mesures suivantes :

1° Publier des cartes magnétiques à grande échelle.

A notre avis, deux formats seraient nécessaires. Celui des routiers pour tout bâtiment de guerre ou de commerce où l'officier des montres aurait le désir et la possibilité de faire des observations exactes permettant de compléter ou de corriger les cartes elles-mêmes; puis, pour la navigation courante, des cartes de 40 centimètres sur 25, analogues à celles que publie l'observatoire maritime de Hambourg auquel les travaux du Dr Neumayer ont acquis une légitime réputation, et qui sont en service sur les paquebots de la Compagnie des messageries maritimes.

2° Adopter pour les compas des feuilles signalétiques détaillées.

Les défauts principaux reprochés aux compas en service à bord des bâtiments sont leur paresse, leur stabilité insuffisante par roulis. Le premier provient le plus souvent de ce que l'emplacement est mal choisi, et qu'actuellement on ne fait aucune observation précise pour savoir si cet emplacement est convenable ou non. On croit pouvoir en juger par la grandeur absolue des déviations, c'est une erreur; il faut absolument joindre à l'observation des déviations celle des valeurs de la force directrice à différents caps.

L'instabilité du compas peut provenir soit de vices de construction, soit simplement, pour un compas bien construit, de ce que l'on n'a pas compensé l'erreur due à la bande. Actuellement, on ne peut savoir laquelle de ces deux causes est en jeu, parce qu'on ne fait jamais les observations qui pourraient l'indiquer.

Enfin, ce qui est encore plus regrettable, on n'a jamais, sur aucun compas, aucun document précis; tout le travail fait dans les ateliers et à bord sur un compas, toutes les remarques auxquelles il a donné lieu ne laissent aucune trace, parce que les observations ne sont notées le plus souvent que sur des feuilles volantes, et qu'on ne les recueille pas d'une façon méthodique, permettant leur centralisation, leur coordination et leur discussion.

Pour remédier à ces inconvénients, il faut absolument adopter pour les compas des feuilles signalétiques aussi détaillées que celles qui concernent les chronomètres, et qui ont fait faire à la construction de ces derniers instruments des progrès si considérables.

Actuellement, les ateliers ne savent point les conditions que le constructeur a réalisées dans le compas qu'il fournit. A son tour, l'officier des montres les ignore et ne sait pas davantage l'opinion soit de l'atelier, soit des officiers des montres qui ont eu avant lui ce compas entre les mains. Quand des avaries ou des changements trop légers pour être une cause de rebut se sont produits dans le pivot, la chape ou la force directrice, entre l'atelier du constructeur et la mise en service à bord, il est impossible de savoir si cela provient de vices de construction, de négligences dans l'envoi ou à l'atelier.

Tous les inconvénients disparaîtraient au grand bien du service en adoptant les types nécessaires de feuilles signalétiques. A notre avis il en faudrait trois, deux absolument indispensables et une troisième facultative qu'emploieraient seulement ceux des bâtiments qui auraient le loisir de faire en rade de bonnes et complètes opérations de régulation ou de compensation.

La feuille signalétique n° 1 contiendrait toutes les données relatives au compas, les observations faites devant la Commission de recette, celles faites plus tard, dans le port, devant l'officier des montres au moment où il prend charge de l'instrument.

La feuille signalétique n° 2 relaterait toutes les observations et toutes les remarques faites à bord. Elle comprendrait donc outre le diagramme de Napier ou courbe des déviations, le signalement détaillé de la place occupée par le compas, des pièces de fer qui l'environnent, les observations de force directrice, le calcul obligatoire des coefficients approchés et exacts et du coefficient λ, le calcul facultatif des divers coefficients P, Q, c, f, v, v', μ, k et R.

Les remarques sur la manière dont le compas se comporte à la mer, par les différentes allures du bâtiment dans les diverses circonstances de temps et de mer.

La feuille signalétique n° 3 serait facultative, elle servirait à recueillir les observations complètes et exactes faites à loisir et avec soin en rade et en cours de campagne, au moyen du relèvement d'un objet terrestre ou d'un astre. Elles serviraient à compléter ou à corriger les cartes magnétiques, en donnant au bureau central tous les éléments nécessaires à la discussion des observations.

Des feuilles analogues à celles que nous désirons ont été mises en service, le 14 septembre 1882, dans la marine de guerre des États-Unis par le commodore John G. Walker qui dirige d'une façon si remarquable et si progressive le bureau de navigation du ministère de la marine. Elles ont reçu la sanction de la pratique et ne sauraient point être taxées de complications superflues.

Avec des additions très peu nombreuses que nous indiquerons plus loin, elles donneraient une satisfaction entière à tous les desiderata exprimés dans ce livre.

Ces feuilles signalétiques se composent de trois imprimés distribués à tous les navires. Nous en donnerons le détail et même les dimensions approximatives pour permettre d'établir des types semblables aux officiers des montres que ces questions intéressent avec les modifications que nous croyons désirables.

L'imprimé américain n° 3 est le type d'après lequel on doit faire l'inventaire des compas existant, le 1er janvier de chaque année, à bord de chaque bâtiment ou dans chacun des ateliers de boussoles des arsenaux. Nous en ferions la feuille signalétique n° 1.

Chaque bâtiment reçoit avant son départ l'inventaire relatif à ses compas et dressé par les soins de l'atelier qui les lui délivre.

La feuille de papier a 40 centimètres sur 23, elle est pliée en deux dans le sens de sa plus petite dimension.

La page 1 porte le titre donné à l'imprimé, soit Inventaire des compas, suivi des indications relatives à l'atelier, au bâtiment et à la date.

En tournant cette page, on ouvre la feuille dans toute sa longueur, et on trouve un tableau contenant onze colonnes verticales dont voici le détail. Le premier chiffre donne le rang de la colonne ; le second plus petit donne sa dimension en centimètres et millimètres.

1.	1,5	Numéro du compas.
2.	3,5	Nom du fabricant et lieu de fabrication.
3.	1,5	Sec ou liquide.
4.	0,8	Diamètre de la rose.
5.	1,8	Usage particulier. Étalon de route, d'embarcation.
6.	2,3	Depuis combien de temps il est à bord ou à l'atelier.
7.	2,3	Sa position à cet instant, dans le bâtiment ou l'atelier.
8.	3	Sensibilité.
9.	3,3	Force directrice.
10.	6,5	Condition générale.
11.	7,5	Remarques.

Ce tableau à colonnes verticales est partagé en bandes horizontales dont chacune contient les indications relatives à un compas.

Chaque compartiment de la colonne 8, relative à la sensibilité, contient trois lignes horizontales portant avec de larges abréviations :

La première : Lecture avant le déplacement.

La seconde : Lecture lorsque la rose est revenue au repos.

La troisième : Différence.

De même chaque compartiment de la colonne 9, relative à la force directrice, contient trois lignes horizontales portant l'une : Temps du premier passage de la division 0° devant la ligne de foi; la seconde, temps du deuxième passage, et la troisième, durée d'oscillation.

En fermant la feuille, on peut lire la page 4 divisée en trois bandes horizontales.

La première a pour titre : Habitacles et alidades. Elle est divisée en trois colonnes verticales intitulées :

La première : Numéro de l'instrument.

La seconde : Matière avec laquelle il est fait.

La troisième : Condition.

La seconde bande horizontale a pour titre : Cercles azimutaux et Index de lecture. Elle est également divisée en trois colonnes verticales intitulées.

La première : Numéro de l'instrument.

La seconde : Matière avec laquelle il est fait.

La troisième : Condition.

Enfin la troisième portion de cette page contient les prescriptions suivantes.

L'inventaire doit être envoyé le premier jour de chaque année au Bureau de navigation. Il doit comprendre, sans exception, tous les compas existant dans l'atelier ou le navire, de quelques grandeur et forme qu'ils soient, qu'ils soient prêts ou non pour le service. Tous ceux qui sont de mêmes forme et grandeur doivent être groupés ensemble dans l'inventaire. Pour obtenir les données des colonnes 8 et 9, les roses doivent être déplacées et observées dans un lieu libre de fer; les compas en essai, éloignés les uns des autres de façon à n'avoir aucune influence réciproque; enfin les compas du navire doivent être mis à terre.

Pour assurer l'uniformité des mesures, on doit procéder ainsi : D'abord déterminer une place convenable. Pour cela on place le compas sur son trépied, à 50 mètres environ, un signal nettement visible, à hauteur du compas. On relève le signal avec le compas. Ceci fait, on intervertit aussi exactement que possible les positions du compas et du signal. On prend du compas le relèvement du signal. Ce relèvement doit différer du premier de 180°; s'il en est autrement, on devra chercher une autre place où il en soit ainsi.

Sensibilité. — Placez la ligne de foi sur la division Nord de la rose; avec un aimant, ou une pièce de fer, placé à même hauteur que la rose, déplacez doucement cette dernière, dans le plan horizontal, de 2° environ vers la droite, laissez la rose revenir au repos; observez avec une loupe la division de la rose qui est alors en regard de la ligne de foi. Faites la même observation, en donnant à la rose un écart de 2° à gauche. Notez toutes les lectures en les estimant aussi exactement que possible.

Force directrice. — Placez la ligne de foi sur le point Nord de la rose, avec un aimant déplacez la rose de *un quart* environ, notez au chronomètre le moment où la division Nord passe devant la ligne de foi, puis le moment du passage suivant. Il est essentiel que la rose et la ligne soient toutes deux parfaitement au repos, avant de faire les expériences. Quand on aurait à sa disposition une aiguille aimantée spéciale ou mieux encore un déflecteur, ce serait avec l'un ou l'autre de ces instruments qu'il conviendrait de faire les observations de force directrice pour avoir des résultats plus exacts. Les observations de sensibilité et de force directrice devraient être faites, notées et signées, par le constructeur devant la commission de recette, par l'atelier conjointement avec l'officier des montres.

Dans la colonne 10, on doit indiquer s'il y a des bulles d'air dans les compas liquides, si elles se sont formées rapidement, leur grosseur et si elles sont gênantes; si le liquide est trouble, la rose décolorée, la ligne de foi indistincte, la cuve étanche, la suspension de la cuve satisfaisante, son mouvement parfaitement libre, ne donnant lieu à aucun coïncement quand le navire roule; s'il y a des difficultés pour mettre en place l'habitacle.

On ne doit noter que les défauts. Toute omission est interprétée dans un sens favorable à l'emploi du compas.

L'imprimé n° 2 serait, à proprement parler, la feuille signalétique de tout compas employé à bord d'un navire. Il doit être rempli par l'officier des montres, signé par le commandant et expédié au Bureau central. Il est formé par une feuille de papier de 43 centimètres sur 35 environ, pliée dans le sens de sa plus petite dimension.

Sur la page 1 on trouve les indications donnant le numéro du rapport, celui du compas auquel il se rapporte, le nom du bâtiment, le lieu et la date de l'observation, le nom de l'officier qui a fait les observations et du commandant du bâtiment.

En ouvrant la feuille, on lit en tête de la page 2 les indications qui donnent la date de l'armement du bâtiment, la date et le lieu donné en latitude et longitude des observations consignées dans le tableau A suivant; l'objet relevé, et, s'il est terrestre, sa distance et son azimut vrai; s'il est céleste, sa hauteur au commencement et à la fin des observations; la déclinaison du lieu observée ou prise sur la carte; l'état de la mer et du temps, sous vapeur ou sous voiles.

Sous ce titre est placé un tableau A contenant neuf colonnes verticales dont voici les dimensions et en-têtes respectifs :

1.	1,2	Cap au compas étalon.
2.	2,4	Heure de l'observation à la montre.
3.	0,8	Correction de l'heure de la montre.
4.	2	Heure apparente du lieu.
5.	2,5	Azimut de l'objet relevé au compas étalon.
6.	2,5	Azimut vrai de cet objet.
7.	2	Variations du compas étalon aux seize caps principaux du compas.
8.	1,8	Déclinaison.
9.	2	Déviations du compas aux seize caps principaux de la rose.

Dans la colonne intitulée déclinaison.

On inscrit la moyenne de tous les azimuts Est donnés par le compas étalon, puis la moyenne de tous les azimuts Ouest donnés par ce même compas :

La moyenne de ces deux quantités donne la moyenne des azimuts de l'objet au compas.

On la retranche de la moyenne des azimuts vrais observés ou trouvés dans les tables pour les heures données et on a ainsi la déclinaison.

Au-dessous du tableau A se trouve sur la même page une bande de 5 centimètres et demi de haut environ et renfermant trois tableaux verticaux.

Dans le premier on inscrit les comparaisons de la montre du bord avec le chronomètre, avant et après les observations.

Dans le second on inscrit le temps local apparent donné par le chronomètre.

On trouve ainsi la correction qu'on doit apporter à l'heure de la montre.

Le troisième petit tableau donne le type du calcul à faire pour trouver l'heure du lieu par l'observation du soleil.

La page 3 en face de la page 2, d'après la disposition de notre feuille, contiendrait à sa partie supérieure une légende donnant la matière avec laquelle est construit le bâtiment; la puissance de la machine; le déplacement; le mode, le lieu, la durée, et le cap de construction; la matière dont sont faits les baux; les pistolets et chantiers d'embarcations, les palans de retenue et autres, les haubans et étais, les cables et aussières, les renforts métalliques des mats et des guis; la quantité, le poids, l'espèce et la disposition des principales pièces en fer contenues dans le navire, ancres, chaînes, machines, canons et canots.

Au-dessous de cette légende se trouverait dans une moitié de la page le diagramme de Napier, et dans l'autre moitié les trois colonnes suivantes :

L'une donnerait pour les seize caps principaux de la rose les différentes valeurs du rapport $\frac{H'}{H}$, H étant la force horizontale terrestre à la place occupée actuellement par le bâtiment : l'autre donnerait le même rapport multiplié par le cosinus de la déviation correspondante c'est-à-dire la comparante de la force directrice vers le Nord magnétique ; la moyenne des nombres contenus dans cette colonne verticale donnerait la quantité λ.

Enfin la troisième colonne donnerait les valeurs du rapport $\frac{H'}{H}$ aux différents caps inscrits dans la première colonne ajoutée, multipliées par la valeur numérique de H donnée par la carte. On aurait ainsi aux différents caps, la force directrice du compas vers le Nord de la rose mesurée avec la force horizontale prise pour unité dans la carte. Au bas de cette page, nous voudrions voir inscrites les valeurs des coefficients λ, A, B, C, D, E, P, Q, c, f, μ, k, R, enfin v et v'.

La page 4 contiendrait un premier tableau B divisé en quatre colonnes verticales principales, les trois premières contiendront respectivement des croquis grossiers, aux $\frac{4}{1000}$ environ, donnant le plan du pont supérieur, du pont de la batterie et du faux pont, la position et, par une cote, la hauteur du compas par rapport à l'un de ces différents ponts. On indiquera sur chacun de ces plans la position des principales pièces de fer dans les environs du compas, on les repèrera par des lettres ou des chiffres et dans la quatrième colonne on donnera la légende relative à tous ces repères.

Au-dessous du tableau B se trouve un autre tableau C divisé en deux parties principales dans le sens vertical.

La première forme un carré de 13 centimètres de côté, divisé par un quadrillage en carrés de 5 millimètres de côté. Au centre du carré, on marque par une circonférence l'emplacement du compas, et dans ce carré on marque exactement l'emplacement à la distance convenable de toutes les pièces de fer qui se trouvent à une distance du centre du compas moindre que 7 mètres et demi. Chaque pièce est repérée par une lettre et la légende de toutes ces lettres est donnée dans la seconde partie de ce tableau.

La page 4 se termine par un autre tableau à colonnes verticales dans lesquelles sont indiquées la nature, la forme, la dimension du compas, à quoi il sert plus spécialement ; s'il est compensé totalement, partiellement, ou non ; s'il est compensé pour la bande depuis combien de temps il est dans le bâtiment ; sa sensibilité, sa stabilité, sa durée d'oscillation à terre ; ses qualités à la mer ; l'emplacement de l'habitacle, la hauteur de la rose au-dessus du pont. On trouverait dans d'autres colonnes la durée de l'oscillation de roulis du bâtiment et l'amplitude maxima des lancés de la rose par roulis de part et d'autre de la ligne de foi, à diverses allures, et par les diverses circonstances de temps et de mer.

Dans quelques lignes on indiquerait les armements antérieurs du bâtiment, ses diverses campagnes et leur durée.

Enfin la page 4 contiendrait les indications générales suivantes :

1° Lorsqu'un bâtiment vient d'être nouvellement armé, de déterminer la table des déviations aux seize rumbs principaux du compas étalon dans les quatre conditions suivantes :

a. Le bâtiment droit et abattant sur bâbord.

b. Le bâtiment droit et abattant sur tribord.

c. Le bâtiment incliné de 6 à 10° sur tribord et abattant sur tribord.

d. Le bâtiment incliné de 6 à 10° sur bâbord et incliné sur bâbord. Si on n'avait pas le temps de faire les deux derniers tours, il faudrait alors compenser l'erreur due à la bande.

Toutes ces observations étant faites au même lieu, et dans le moindre temps possible.

2° Ces observations doivent être faites au moins deux fois par an, à un intervalle de six mois.

3° Toutes les fois que le bâtiment change de 15° soit en latitude soit en longitude, il est bon de refaire quand on le peut des observations directes de variation aux huit caps principaux de la rose, le bâtiment étant droit, puis incliné d'un angle de 6 à 10° ou tout au moins les deux observations donnant B et C.

4° Toutes les fois que les circonstances le permettent, on doit, quand on quitte un port ou une rade où le bâtiment a gardé le même cap pendant plusieurs jours, faire un tour d'horizon, le bâtiment droit, en s'arrêtant aux huit caps principaux de la rose, et cinq minutes à chaque cap avant de prendre les observations. Il serait meilleur encore de faire, à blanc, deux tours d'horizon successifs en sens contraires avant celui qui servirait à déterminer les déviations.

La feuille signalétique n° 3 contiendrait un tableau intitulé : Sommaire des observations les plus exactes faites pour déterminer les erreurs du compas pendant la navigation du bâtiment, depuis le dernier rapport. On marquera d'un astérisque les observations que l'on croit les meilleures.

Ce tableau contient onze colonnes verticales.

1.	2,5	Date de l'observation.
2.	3	Lieu de l'observation par latitude et longitude.
3.	1,5	État du temps.
4.	1,5	État de la mer.
5.	1,5	Sous voile, sous vapeur et en rade.
6.	1,7	Cap étalon n°.
7.	1,7	Erreurs totales du compas n°.
8.	1,7	Déviations.
9.	2	Déclinaisons.
10.	1,5	Bâtiment droit ou incliné et alors de quel bord et de quel angle.
11.	9	Indications générales.

On y joindrait le calcul de l'heure au moyen d'observations astronomiques ou du chronomètre le n° du coupon et la feuille signalétique n° 2.

Ce tableau est destiné à obtenir les données nécessaires à l'établissement de la carte de la déclinaison magnétique, en conséquence on laissera en blanc les colonnes 8 et 9 qui seront remplies par le Bureau central.

En admettant que cette feuille n° 3 fût supprimée dans les types servant dans la navigation courante, il faudrait au moins que chaque compas eût les deux premières et que les feuilles de tous les compas d'un bâtiment fussent jointes au devis d'armement. On aurait ainsi tous les éléments nécessaires au contrôle de l'emplacement occupé par le compas, au choix d'un meilleur emplacement, enfin à la régulation et à la compensation rapides et cependant très approchées, au moyen d'observations faites à un seul cap.

Nous sommes persuadés que si l'on adoptait des types semblables ou à peu près pour recueillir toutes les observations faites à bord des bâtiments, non seulement la question particulière du choix d'un compas, mais encore celle bien autrement importante du magnétisme terrestre seraient rapidement résolues.

Pour y intéresser les officiers des montres ou les commandants des différents navires, il suffirait certainement de publier chaque année dans le recueil hydrographique de la nation à laquelle ils appartiennent le sommaire des rapports, les résultats principaux et les noms de ceux qui les ont faits et obtenus. De la sorte, chacun, certain que ses efforts ne resteraient pas anonymes ou ne serviraient plus seulement à une compilation où les observations perdent toute trace de leur origine pour ne conserver que le nom de celui qui les a discutées et publiées, mettrait à rassembler des données exactes un soin et un amour-propre dont le bien public profiterait à coup sûr.

TRAITÉ

DES

DÉVIATIONS DU COMPAS

INTRODUCTION PRÉLIMINAIRE

PREMIÈRE SECTION

RAPPEL DES NOTIONS ÉLÉMENTAIRES DE MÉCANIQUE

Nous croyons utile, avant d'exposer la théorie de la déviation des compas, de résumer et de grouper les notions élémentaires fort simples soit de Mécanique, soit de Physique, auxquelles nous aurons à faire appel dans le courant de l'ouvrage.

Nous commencerons par ce qui concerne la Mécanique, en renvoyant les lecteurs qui désireraient des explications plus détaillées aux cours de Mécanique professés à l'École Polytechnique soit par le regretté Edmond Bour, soit par M. Résal, Membre de l'Institut, ou encore à celui que vient de publier M. Collignon, Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées.

CHAPITRE PREMIER

MOUVEMENT D'UN POINT MATÉRIEL

Force. — Toute cause de mouvement, quelle qu'elle soit, reçoit en Mécanique le nom générique de force. Pour définir complètement une force, il faut donner son point d'application, la direction dans laquelle elle agit, enfin sa grandeur. On représente une force par une ligne droite. A étant le point d'application, on prend sur la ligne qui représente la direction de la force une longueur AF proportionnelle au nombre qui en mesure l'intensité, et l'on obtient une ligne AF qui est dite représenter la force en grandeur et en direction.

Accélération. — Une force constante agissant sur un point matériel primitivement en repos lui communique, suivant sa direction, un mouvement rectiligne uniformément varié. On appelle ainsi tout mouvement dans lequel la vitesse varie proportionnellement au temps. Le rapport constant qui existe ainsi entre la vitesse acquise par le point dans un temps donné et ce même temps, s'appelle l'aeeélération du mobile.

Si l'on considère plusieurs forces F, F', F'', et qu'on désigne par j. j', j'', l'aeeélération de mouvement que chacune d'elles imprime à un même point matériel, on démontre que l'on a :

$$\frac{F}{j} = \frac{F'}{j'} = \frac{F''}{j''} = \qquad \frac{p}{g} = m.$$

En appelant p le poids du point, g l'accélération de la pesanteur.

Ce rapport constant pour un même point matériel s'appelle la *masse* du point.

Mesure des Masses et des Forces. — Soit un corps de poids P, de masse M, prenant sous l'action d'une foree F une accélération j. On a $P = Mg$; la masse d'un corps est done proportionnelle au poids de ce corps, autrement dit à la quantité de matière contenue dans ee poids. — On a aussi $F = Mj$ et ceci montre que quand on a fixé les unités de longueur et de temps qui définissent l'accélération j, on peut prendre arbitrairement, soit l'unité de masse, soit l'unité de foree, mais qu'une fois, l'une des deux fixée, l'autre s'en déduit forcément. Autrefois, on prenait pour troisième unité fondamentale eelle de foree, et on convenait de prendre pour cette unité la foree exercée par la pesanteur en un lieu donné, sur un poids marqué déterminé, le kilogramme par exemple.

Mais eette unité varie avee le lieu eonsidéré. Au contraire, si on compare la masse au poids et qu'on la prenne pour troisième unité fondamentale, on aura une unité invariable, car si le poids d'un corps varie avee le lieu, l'aecélération que la pesanteur lui imprime varie exactement dans la même proportion. Nous dirons donc que la force P exercée par la pesanteur sur un corps est égale à Mg; M étant la masse du eorps en kilogrammes et g l'accélération en mètres par seeondes.

Équilibre. — D'après le prineipe de l'inertie de la matière, en vertu duquel un point matériel en repos ne peut jamais prendre de mouvement ni le modifier sans l'action d'une cause externe, toutes les fois que nous voyons un point matériel en repos ou en mouvement rectiligne uniforme, nous devons affirmer qu'il n'est soumis à aucune force ou que, si une certaine force agit sur lui, il y a d'autres forces qui font équilibre à celle-là. On voit donc que, si l'accélération qu'un point matériel prend sous l'action d'une force nous a fourni un premier moyen de comparaison entre les forces, l'équilibre d'un point va nous en fournir un autre.

Nous dirons que deux forces quelconques, quels que soient leur nature physique et le nom sous lequel on les désigne, sont égales quand elles font équilibre à une même force.

Composition des Forces. — Quand un point matériel est soumis à l'action simultanée de plusieurs forces qui ne se font pas équilibre, il se meut suivant une direction déterminée, et l'on conçoit nettement qu'on puisse produire le même mouvement à l'aide d'une force unique agissant suivant cette direction. Cette force unique est ce qu'on appelle la Résultante des forces qui ont mis le mobile en mouvement et celles-ci sont nommées les composantes de la première.

La Mécanique considère d'abord le cas le plus simple, celui de deux forces seulement agissant sur le point matériel, et elle nous apprend que la Résultante de deux forces peut être représentée en grandeur et en direction par la diagonale du parallélogramme construit sur les deux droites qui représentent les forces considérées.

Ainsi AR représente la résultante des deux forces AF et AG appliquées en A, *fig.* 1.

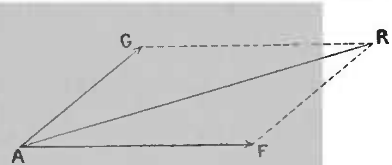


Fig. 1.

Pour composer un nombre quelconque de forces, on cherchera d'abord la résultante partielle de deux d'entre elles, puis la résultante de cette résultante partielle et de la troisième force, et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive à composer la dernière de ces résultantes partielles avec la dernière force considérée. Il est aisé de voir que cette construction peut se ramener à une autre plus simple, qui consiste à mener par le point F, extrémité de la première force, une droite égale et parallèle à la deuxième force et de même sens qu'elle; par l'extrémité de cette dernière une droite égale parallèle et de même sens, etc..., et ainsi de suite jusqu'à ce qu'on arrive à porter la dernière force à l'extrémité de la précédente.

En joignant le point A au dernier sommet du polygone ainsi obtenu, on aura la résultante demandée. On a appliqué cette construction dans les *fig.* 2 et 3 au cas de quatre forces.

Quand il s'agit de composer trois forces, il est aisé de voir que

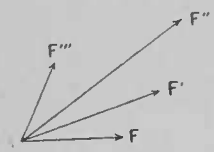


Fig. 2.

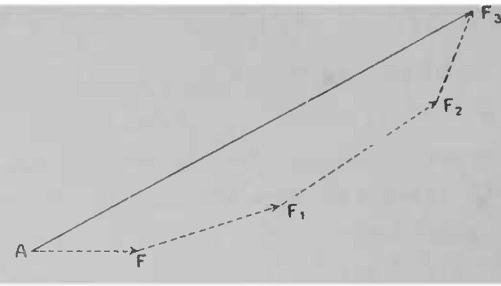


Fig. 3.

leur résultante est représentée, en grandeur et en direction, par la diagonale du parallélipipède construit en prenant les trois forces pour arêtes.

Décomposition des forces. — Réciproquement, une force étant donnée, on pourra, pour la commodité du raisonnement, la décomposer en deux ou trois composantes suivant des directions déterminées. Les relations analytiques qui existent entre une force et ses composantes par rapport à deux ou trois directions sont très simples quand ces directions sont rectangulaires entre elles.

Prenons d'abord une force et décomposons-la suivant deux directions ox, oy perpendiculaires entre elles et situées dans un même plan avec OF.

On a, *fig.* 4, en appelant α l'angle FOA,

$$OA \text{ ou } F_x = F\cos\alpha; \qquad OB \text{ ou } F_y = F\sin\alpha;$$

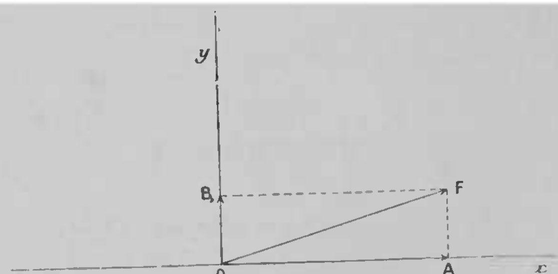


Fig. 4.

enfin :

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2.$$

Passons maintenant au cas le plus général dans la pratique, celui où l'on décompose une force suivant trois directions perpendiculaires entre elles, *fig.* 5. Oy est perpendiculaire sur Ox, et Oz est perpendiculaire au plan qui contient Ox et Oy.

Abaissons de F une perpendiculaire FP au plan xOy.

On aura dans le plan z OP, en appelant θ l'angle zOF :

$$\text{FP ou } F_z = F \cos\theta,$$
$$OP = F \sin\theta.$$

Si nous décomposons maintenant OP suivant les deux directions *oz* et *oy*, on aura :

$$F_x = F \sin\theta \cos\alpha,$$
$$F_y = F \sin\theta \sin\alpha,$$

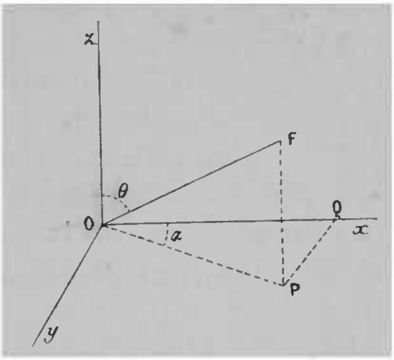


Fig. 5.

et enfin :

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2 + F_z^2.$$

Tout ce que nous venons de rappeler et tout ce qui se rapporte au mouvement d'un point matériel se déduit des deux premiers principes de la Mécanique rationnelle : le premier, qu'on appelle *loi de l'inertie*, se formule ainsi :

Un point matériel en repos ne peut jamais prendre de mouvement sans la présence d'une cause externe.

Le second, qu'on appelle *loi de l'indépendance des effets des forces simultanées,* s'énonce ainsi :

Une force agit sur un point matériel en mouvement et sollicité par des forces quelconques, absolument comme si elle était seule et comme si le point était en repos, c'est-à-dire indépendamment des autres forces qui agissent simultanément sur le corps ou du mouvement précédemment acquis.

CHAPITRE II

MOUVEMENT D'UN SYSTÈME MATÉRIEL

Quand on veut passer de l'étude du mouvement d'un point matériel à celle du mouvement d'un corps, considéré comme un assemblage de points matériels, on est obligé de faire intervenir un troisième principe, celui de *l'égalité de l'action et de la réaction,* que l'on peut énoncer ainsi :

Si un point matériel M reçoit d'un autre point matériel M' une certaine action f, réciproquement le point M' reçoit de M une action égale et contraire f' qu'on appelle la réaction du point M.

La Mécanique tout entière est fondée sur ces trois principes, qu'on peut considérer comme de véritables postulats, analogues à la proposition célèbre qui sert de base à la théorie des parallèles. Leur exactitude est rendue à posteriori incontestable par la vérification expérimentale des résultats que la Mécanique rationnelle en déduit par des raisonnements rigoureux. La plus grande preuve de ce genre se trouve dans la concordance remarquable des mouvements des corps célestes avec les lois théoriques de ces mouvements.

On peut, sans altérer en rien l'état d'un corps en équilibre, remplacer par leur résultante des forces appliquées en un même point de ce corps.

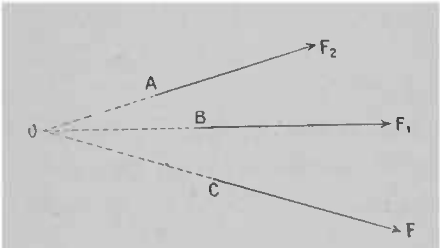


Fig. 6.

Si nous considérons, *fig.* 6, des forces dont les directions concourent en un point O, mais dont les points d'application sont en A, B, C, nous pouvons, en raisonnant comme plus haut, trouver leur résultante géométrique, et cependant, si le point de concours de ces forces est en dehors du corps solide, il y a évidemment absurdité à demander à substituer la résultante à ses composantes. Il suffit pourtant qu'il y ait un point du solide sur la direction de cette force pour qu'on puisse le faire sans altérer l'équilibre. En général, une force appliquée à un point d'un solide invariable en équilibre peut être supposée appliquée en un point quelconque pris sur sa direction, pourvu que ce point soit invariablement lié au solide.

Quand on cherche à composer deux forces parallèles, on arrive à un cas particulier remarquable, qui conduit à une idée nouvelle jouant un grand rôle en Mécanique.

En appliquant les principes de la Composition des forces, on voit que deux forces parallèles et de même sens ont une résultante qui leur est parallèle, dirigée dans le même sens, égale à leur somme, et qui partage la ligne joignant les points d'application des forces composantes en parties inversement proportionnelles à leurs grandeurs.

Si nous prenons maintenant deux forces parallèles mais de sens contraires, nous verrons qu'elles ont une résultante parallèle aux deux composantes, égale à leur différence, agissant dans le sens de la plus grande et telle que ses distances aux deux composantes sont dans le rapport inverse de ces forces.

Ainsi, *fig.* 7, la résultante R des deux forces P et Q est telle, que $R = P - Q$, et que $\frac{CA}{CB} = \frac{Q}{P}$, d'où nous tirons, $\frac{CA}{AB} = \frac{Q}{P - Q}$.

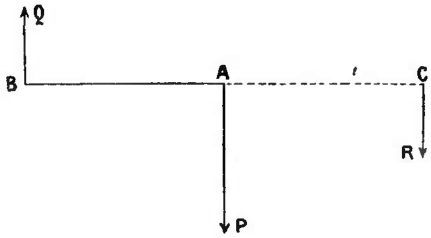


Fig. 7.

Notion du couple. — Si la différence P — Q est fort petite, il en sera de même de la grandeur de la résultante, et de plus sa distance à l'une ou l'autre de ses composantes augmente à mesure que cette différence diminue. A la limite, si on fait $P = Q$, on trouve pour cette résultante une force nulle appliquée à l'infini, ce qui n'a plus de sens : ainsi, deux forces égales parallèles et de sens contraires, mais non directement opposées, constituent un système particulier, qui n'est pas susceptible d'être tenu en équilibre par une simple force. C'est évidemment le plus simple des systèmes non réductibles à une force unique : un pareil système porte le nom de couple.

Notion du centre de gravité. — Quand plusieurs forces parallèles sont appliquées en différents points d'un corps solide, on peut les composer en une seule, en prenant d'abord deux d'entre elles, puis cette première résultante partielle avec la troisième force, etc. Le théorème que nous avons donné plus haut nous montre que le point d'application des résultantes successives ne dépend ni de la direction des forces, pourvu qu'elles restent parallèles, ni de leurs grandeurs absolues, pourvu qu'elles conservent toujours entre elles le même rapport. Par suite, la direction de la résultante totale passe toujours par un même point de quelque façon qu'on incline les forces par rapport à leur direction primitive et de quelque manière qu'on altère les grandeurs absolues de ces forces, pourvu qu'elles conservent entre elles les mêmes rapports. Ce point invariable s'appelle le centre du système des forces parallèles.

Dans le cas où les forces parallèles appliquées au solide sont les actions de la pesanteur sur les différents points matériels qui le composent, le centre des forces parallèles prend le nom de Centre de gravité.

Moment d'une force. — On appelle moment d'une force F, ar rapport à un point O situé dans son plan, le produit AF $\times$ OP, ou $F \times p$, de la longueur qui représente la force en grandeur et en direction par la longueur de la droite OP, perpendiculaire abaissée du point O sur la force.

Si l'on imagine que la droite OP soit rigide et puisse tourner autour du point O, la force F aura pour effet de l'entraîner autour de ce point dans un sens ou dans l'autre. On affecte du signe + une de ces rotations choisie arbitrairement, et on donne le signe — à la rotation en sens contraire.

On appelle moment d'une force par rapport à un axe, le produit de la projection de la force sur un plan perpendiculaire à l'axe par la plus courte distance de la force à l'axe. On affecte ce moment du signe + ou du signe —, d'après une convention semblable à celle faite précédemment.

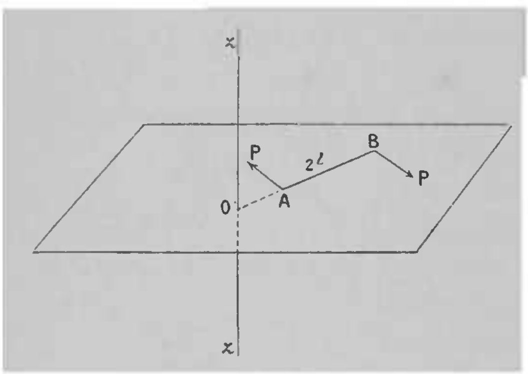


Fig. 8.

Moment d'un couple (*fig.* 8). — Si on applique ces définitions à un couple et qu'on prenne le moment des deux forces de ce couple par rapport à un axe perpendiculaire au plan du couple, il est évident que le moment de ce couple sera constant, quelle que soit la position de l'axe, et égal à $P \times 2l$; si P désigne la grandeur de l'une des forces et $2l$ la distance qui les sépare.

On affecte ce moment du signe + ou du signe —, suivant le sens de la rotation que le couple imprimerait à la droite OA, si elle pouvait tourner autour de O. Cette constance du moment d'un couple par rapport à une droite perpendiculaire à son plan a conduit à représenter les couples très simplement.

On porte sur une droite perpendiculaire à leur plan une longueur proportionnelle à ce moment constant, dans un sens ou dans l'autre, suivant le sens de la rotation que le couple ferait naître. Cette droite s'appelle l'axe du couple. On voit que, seule, la direction de cette droite est complètement déterminée, mais qu'on reste maître de la faire passer par un point quelconque de l'espace. Cette représentation d'un couple par une droite conduit immédiatement à la composition de deux couples, puis d'un nombre quelconque de couples.

Les forces et les couples n'entrent jamais dans les problèmes de Mécanique, que par leurs projections sur trois axes et par leurs moments, par rapport à ces trois axes ; on dit alors que deux couples sont équivalents quand ils peuvent se remplacer dans les équations, et pour cela il faut et il suffit : 1° que les plans des deux couples soient parallèles ; 2° que leurs moments soient égaux ; 3° que les deux couples tendent à faire tourner leurs bras de levier respectifs dans le même sens.

CHAPITRE III

ÉQUATIONS GÉNÉRALES DE L'ÉQUILIBRE

En s'appuyant sur ce qu'une force F (*fig.* 9), appliquée en un point A d'un solide invariable, peut être transportée parallèlement à elle-même en un autre point O du même solide, pourvu qu'on adjoigne à cette force ainsi transportée un couple situé dans un plan parallèle au plan FOA et ayant pour moment le produit de la force F par la distance du point O à la direction de cette force ; on arrive à ce théorème important, qu'un système de forces quelconques, appliqué à un solide invariable, peut toujours être remplacé et d'une infinité de manières par une force unique et un couple unique. La force unique s'appelle la résultante de translation. Sa grandeur, sa direction, son sens restent les mêmes, quel que soit le point pris pour origine. On choisit ordinairement le centre de gravité du corps.

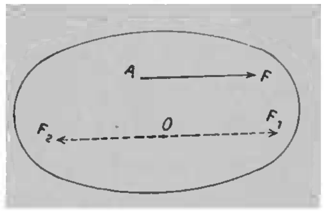


Fig. 9.

Cela posé, comme une force ne saurait dans aucun cas faire équilibre à un couple, il est nécessaire et aussi suffisant pour l'équilibre que la résultante de translation soit nulle et que le couple résultant du transport de toutes les forces en un même point soit aussi nul. Sachant par l'analyse que la longueur d'une droite est nulle, quand ses projections sur trois axes sont nulles, et nous rappelant qu'un couple est représenté par son moment ou, ce qui revient au même, par son axe, on voit qu'on sera conduit à six équations qui seront les équations générales de l'équilibre des solides.

On arrive d'ailleurs à ces équations fondamentales, par une autre voie que nous allons indiquer.

Travail d'une force. — Considérons une force appliquée à un point matériel A, et supposons que sous l'action de cette force le point A ait parcouru dans un temps dt un arc infiniment petit AA' que nous représenterons par ds. On appelle travail élémentaire de la force F, correspondant au déplacement A A' de son point d'application, le produit de la force par le chemin parcouru projeté sur la direction de cette force. Cette définition se traduit par l'équation :

$$d\mathrm{T}\,\mathrm{F} = \mathrm{F} \times ds \cos \overline{\mathrm{F}ds}.$$

En faisant la somme des travaux élémentaires correspondant à chacun des éléments d'un intervalle de temps fini, on obtient la valeur du travail de la force F pendant ce temps fini.

De la définition du travail, de celle de la résultante d'un nombre quelconque de forces, résulte immédiatement que :

Le travail de la résultante d'un nombre quelconque de forces, agissant sur un point matériel en mouvement, est égal à la somme des travaux des composantes.

Déplacement virtuel. — Travail virtuel. — Quand un point matériel sort de l'état de repos ou de mouvement uniforme, par l'action d'une force donnée, le déplacement qu'il va prendre, son déplacement réel en un mot, est parfaitement déterminé, il n'y en a qu'un. Au contraire, on appelle déplacement virtuel de ce point, tout déplacement infiniment petit qu'on peut attribuer par la pensée à ce même point primitivement en équilibre.

Le travail d'une force qui correspond à un déplacement virtuel, s'appelle travail virtuel.

Équilibre d'un point matériel. — Quand un point matériel est soumis à un nombre quelconque de forces, on peut les remplacer par leur résultante, c'est-à-dire par la ligne qui ferme le polygone des forces données : la condition nécessaire et suffisante pour l'équilibre de ces forces, et par suite pour l'équilibre du point, c'est évidemment que le polygone soit fermé, c'est-à-dire que la résultante soit nulle. En introduisant la notion de travail et nous rappelant qu'une force nulle a toujours un travail nul, nous dirons : Pour qu'un point matériel soit en équilibre, le travail de la résultante des forces appliquées à ce point doit être nul pour tout déplacement virtuel attribué au point matériel ; et, comme nous savons que le travail de la résultante des forces appliquées à un point est égal à la somme des travaux de toutes les composantes, nous pouvons dire encore :

Pour qu'un point matériel soit en équilibre, il faut et il suffit que la somme des travaux de toutes les forces appliquées à ce point soit nulle pour tous les déplacements virtuels imaginables.

Équilibre d'un système matériel. — Concevons maintenant plusieurs points matériels joints ou liés ensemble de telle sorte que le mouvement de l'un d'entre eux influe sur celui de tous les autres ; un pareil ensemble de points s'appelle un système matériel. Il est clair que les points matériels qui le constituent exercent les uns sur les autres des efforts inconnus, tensions ou pressions, que l'on confond sous le nom de forces intérieures et dont il est nécessaire de tenir compte. Nous dirons donc :

Pour tout point faisant partie d'un système matériel et en équilibre, la somme des travaux des forces appliquées à ce point, tant intérieures qu'extérieures, est nulle pour un déplacement virtuel quelconque.

En appliquant le même raisonnement à tous les points qui constituent un système en équilibre, et faisant la somme de toutes les équations se rapportant aux divers points, on voit que dans un système matériel en équilibre la somme des travaux de toutes les forces, tant intérieures qu'extérieures, est égale à zéro, quels que soient les déplacements virtuels infiniment petits et indépendants les uns des autres, que l'on imagine être pris en même temps par les différents points du système.

On verrait aisément que, réciproquement, si la somme des travaux virtuels de toutes les forces appliquées au système, tant extérieures qu'intérieures, est nulle pour tous les déplacements imaginables des divers points qui le composent, le système, supposé primitivement en repos, ne sortira pas de cet état de repos.

Il est évident qu'on ne peut songer à faire une pareille vérification pour s'assurer si un système auquel on appliquera ces différentes forces sera en équilibre ; cette réciproque serait donc inutile, si on n'avait des moyens de discerner, dans chaque cas particulier, parmi ces conditions en nombre infini, celles qui sont suffisantes pour l'équilibre du système.

Le seul cas qui présente de l'intérêt est celui d'un système à liaisons, et on démontre en mécanique que, dans ce cas, il faut et il suffit, pour l'équilibre du système, que la somme des travaux virtuels des forces directement appliquées ou extérieures à ces différents points, soit nulle pour tout déplacement infiniment petit, compatible avec les liaisons, parce que les travaux des forces intérieures sont nuls séparément pour de tels déplacements.

Équations générales de l'équilibre d'un système quelconque. — Quelle que soit la constitution d'un système matériel dont on recherche les conditions d'équilibre, il est clair qu'on n'altère pas cet équilibre supposé établi en supposant le système invariable de forme. Donc les équations qui répondent aux déplacements virtuels compatibles avec la rigidité du système, s'appliquent à tous les systèmes matériels imaginables.

Nous allons voir que ces équations sont au nombre de six; on leur donne le nom d'équations générales de l'équilibre, parce qu'elles s'appliquent à un système quelconque. Elles sont les seules qui soient générales, car elles sont suffisantes dans le cas d'un solide invariable. Dans les autres cas, elles sont nécessaires, mais elles ne sont pas suffisantes, et, après s'être assuré qu'elles sont vérifiées, il faudra rechercher quelles sont les nouvelles conditions introduites par la nature spéciale du système dont on s'occupe.

Les équations générales d'équilibre sont, avons-nous dit, au nombre de six :

En effet, les mouvements compatibles avec la solidité d'un système sont de trois sortes :

1° Un mouvement de translation rectiligne dans une direction quelconque;

2° Un mouvement de rotation autour d'un axe passant par un point quelconque.

3° Un mouvement composé des deux précédents, qui se ramène par conséquent au mouvement d'une vis dans son écrou.

L'application du théorème du travail virtuel à ce dernier cas ne nous donnera rien de nouveau, car le travail de chaque force dans un travail de ce genre est la somme des travaux qui correspondent aux mouvements composants.

Le théorème du travail virtuel appliqué à un déplacement virtuel δs dans une direction quelconque nous donne :

$$\Sigma \mathrm{F}.\delta s.\cos\overline{\mathrm{F}.\delta s}=0,$$

ou, puisque δs est facteur commun :

$$\Sigma \mathrm{F}.\cos\overline{\mathrm{F}.\delta s}=0,$$

c'est-à-dire que la somme des projections des forces extérieures sur une direction quelconque doit être nulle. L'analyse nous apprend qu'il suffit, pour que cette condition soit satisfaite, que cette somme soit nulle simultanément sur trois axes rectangulaires : donc trois équations.

Donnons maintenant au corps un déplacement angulaire $\delta\alpha$ autour d'un axe quelconque. Le travail d'une force dans ce mouvement est égal au produit $\delta\alpha$ par le moment de la force pris par rapport à l'axe considéré. Si nous désignons par MF ce moment, on aura :

$$\Sigma\,\delta\alpha . \mathrm{MF} = 0,$$

ou puisque $\delta\alpha$ est le même pour toutes les forces

$$\Sigma\,\mathrm{MF} = 0,$$

c'est-à-dire que la somme des moments des forces extérieures autour d'un axe quelconque est nulle. Et l'analyse nous apprend qu'il suffit, pour que cette condition soit remplie, que cette somme soit nulle pour trois axes rectangulaires se coupant en un point donné. Donc trois nouvelles équations, qui, jointes aux trois précédentes, donnent les six équations générales de l'équilibre.

On arrive encore à ces équations de la manière suivante.

Mouvement d'un solide libre. — Pour déterminer le mouvement d'un solide libre soumis à des forces données, la méthode ordinaire consiste à décomposer ce mouvement en deux et à rechercher séparément :

1° Le mouvement du centre de gravité du corps;

2° Le mouvement du corps par rapport à trois axes, ayant pour origine son centre de gravité et animés d'un mouvement de translation dont la vitesse est à chaque instant celle de ce point.

Le mouvement du centre de gravité est produit par la résultante de translation de toutes les forces données, qu'on suppose appliquée en ce point. Ce mouvement est donc connu. Quant au mouvement du corps autour de ce point ou par rapport aux trois axes passant par ce point et animés d'un *mouvement de translation* on peut l'étudier, grâce à ce que le mouvement des axes est de translation, comme si l'origine était fixe, ce qu'on exprime en disant :

« Un corps solide tourne autour de son centre de gravité comme si celui-ci était fixe. »

Avant d'aborder le problème de la rotation d'un corps autour d'un point, il faut d'abord résoudre celui plus simple de la rotation d'un corps autour d'un axe fixe, autour duquel le corps peut seulement tourner.

Force d'Inertie. — Concevons un point matériel soumis à plusieurs forces; ces forces peuvent se composer en une seule qui est leur résultante; si nous concevons qu'on applique au point une force égale et contraire à la résultante de toutes les forces qui agissent sur lui, le point se trouverait en équilibre. Cette force fictive, égale et contraire à la résultante des forces réelles qui agissent sur ce point, s'appelle la force d'inertie du point.

Si donc nous considérons en chaque point matériel l'ensemble des forces extérieures, des forces intérieures et de la force d'inertie du point, nous pourrons énoncer ce qu'on appelle le principe de d'Alembert :

« Il y a équilibre à chaque instant entre les forces extérieures directement appliquées aux divers points d'un système quelconque en mouvement, les forces d'inertie de ces points et les forces intérieures résultant des liaisons du système matériel. »

Il ne faut pas oublier là qu'il ne s'agit que d'un équilibre fictif entre des forces, car nous avons eu besoin pour énoncer le théorème d'adjoindre aux forces extérieures et aux forces intérieures (les seules qui agissent réellement sur chaque point), les forces d'inertie que nous avons définies plus haut et qui sont des forces fictives, de pures conceptions de l'esprit.

Le corps *se meut,* mais durant ce mouvement et à chaque instant il y a équilibre entre les forces que nous venons d'énumérer, et cet équilibre permet dans certains cas de trouver les lois du mouvement du corps. Puisqu'à un instant donné, nous avons à considérer en chaque point du système des forces parfaitement définies qui se font équilibre, nous pouvons appliquer le théorème du travail virtuel, en ayant bien soin de joindre aux forces extérieures et intérieures les forces d'inertie de chaque point. Nous serions ainsi conduits à poser les équations du mouvement de chaque point considéré seul, et il n'y aurait là aucun progrès sur la dynamique du point. Mais si, au lieu de considérer un déplacement virtuel quelconque, on s'astreint à ne considérer que les déplacements virtuels compatibles avec les liaisons du système, on sait que, pour ces déplacements virtuels particuliers, les travaux des forces intérieures sont nuls; et il suffit dès lors, pour appliquer le théorème du travail virtuel au mouvement, à la dynamique d'un système matériel à liaisons, de considérer les forces extérieures directement appliquées aux différents points et les forces d'inertie de ces mêmes points.

CHAPITRE IV

MOUVEMENT AUTOUR D'UN AXE

Mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. — Vitesse angulaire. — Accélération angulaire. — On a étendu facilement le sens des mots vitesse et accélération, définis pour un mouvement rectiligne, au cas où le point matériel se meut suivant un cercle, décrivant ainsi autour du centre de ce cercle un angle α variable avec le temps. Si, dans un certain temps très court dt, un angle variable reçoit un accroissement $d\alpha$, on appelle vitesse de l'angle ou vitesse angulaire du point considéré le rapport $\frac{d\alpha}{dt}$.

Il est clair que cette vitesse angulaire est la même à un même instant pour tous les points qui sont sur le rayon allant du centre au point considéré. Désignons cette vitesse angulaire $\frac{d\alpha}{dt}$ par ω. La dérivée de cette quantité $\frac{d^2\alpha}{dt^2}$ ou $\frac{d\omega}{dt}$ s'appellera l'accélération angulaire. Il est clair que la vitesse linéaire d'un point situé à une distance r du centre de rotation sera $r\frac{d\alpha}{dt}$ ou $r\omega$.

Cette définition rappelée, étudions le mouvement d'un solide autour d'un axe fixe. Le seul mouvement compatible avec les liaisons du système est ici une rotation autour de cet axe ; nous n'aurons donc qu'une seule équation d'équilibre à écrire, celle qui exprime que la somme des moments des forces extérieures et des forces d'inertie pris par rapport à cet axe est nulle.

Désignons par N, d'une manière générale, la somme des moments des forces extérieures par rapport à l'axe, et cherchons l'expression des moments des forces d'inertie. Nous avons défini la force d'inertie dans le cas le plus général, mais il est bien clair qu'au lieu de considérer le mouvement unique d'un point matériel et la force d'inertie unique et déterminée qui correspond à ce mouvement, on peut décomposer le mouvement du point en plusieurs autres mouvements composants (exactement comme nous avons décomposé une force en plusieurs autres), et alors, au lieu de considérer la force unique d'inertie dont nous venons de parler, nous aurons à considérer l'ensemble de ses composantes, c'est-à-dire les forces d'inertie relatives à chacun des mouvements composants dans lesquels il nous aura plu de décomposer le mouvement du point. Quand un point décrit l'arc MM′ sur un cercle, *fig.* 10, on peut remplacer cet arc par le chemin MT parcouru sur la tangente et le chemin TM′ parcouru sur la normale. Le premier s'effectue sous l'action de la force $m\frac{dv}{dt}$, si v est la vitesse suivant la tangente; le second, sous l'action de la force $m\frac{v^2}{r}$, si r désigne le rayon du cercle.

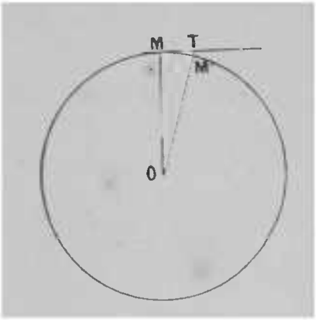


Fig. 10

Par conséquent, nous avons à considérer les deux forces d'inertie, $-m\frac{dv}{dt}$, dirigée suivant la tangente en sens inverse du mouvement du point, et $-m\frac{v^2}{r}$, dirigée suivant la normale et vers l'extérieur du cercle.

Le moment de cette dernière par rapport à l'axe de rotation qui passe par O est évidemment nul, puisqu'elle rencontre cet axe : et il nous reste simplement le moment de la première, qui est évidemment :

$$-m\frac{dv}{dt}\times r;\ \text{or}\ v=r\,\omega;\ \text{donc}\ \frac{dv}{dt}=r\frac{d\omega}{dt},$$

et on a pour le moment considéré :

$$-mr^2\frac{d\omega}{dt}.$$

En faisant la somme des moments de toutes ces forces pour tous les points matériels, on aura pour l'équation du mouvement :

$$N-\Sigma m r^2\times\frac{d\omega}{dt}=0,$$

et puisque $\frac{d\omega}{dt}$ est le même pour tous les points

$$N-\frac{d\omega}{dt}\Sigma m r^2=0,\ \text{c'est-à-dire :}\ \frac{d\omega}{dt}=\frac{d^2\alpha}{dt^2}=\frac{N}{\Sigma m r^2}.$$

En comparant cette équation à celle du mouvement d'un point matériel qui se déplace sous l'action d'une force F et dans la direction de cette force et qui est : $\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$, on voit que l'accélération dans le mouvement de translation $\frac{dv}{dt}$ et l'accélération dans le mouvement de rotation $\frac{d\omega}{dt}$ s'expriment en fonction d'éléments différents. Les seconds membres des équations qui donnent ces deux quantités diffèrent notablement, car pour passer du mouvement de translation au mouvement de rotation :

1° la force a dû être remplacée par son moment;

2° la masse du point a été remplacée par le produit $m\,r^2$ de cette masse par le carré de la distance à l'axe.

Définition du Moment d'inertie. — Cette quantité complexe, $\Sigma m r^2$, qui joue dans le mouvement de rotation d'un corps autour d'un axe un rôle analogue à celui de la masse du même corps dans le mouvement rectiligne, a une importance capitale en Mécanique. On l'appelle le moment d'inertie du corps par rapport à l'axe considéré. On emploie quelquefois en Mécanique, au lieu du moment d'inertie $\Sigma m r^2$, une quantité égale $M\,k^2$, où M est la masse totale du corps considéré et k une longueur définie par l'égalité :

$$\Sigma m r^2 = M k^2$$

Cette longueur k s'appelle le rayon de gyration du solide. Considérons un solide quelconque, prenons un point quelconque dans ce solide et par ce point faisons passer une infinité de droites.
solide donné a un moment d'inertie par rapport à chacune de ces droites; si nous imaginons qu'on porte sur chaque droite à partir du point considéré une longueur inversement proportionnelle à la racine carrée du moment d'inertie correspondant, c'est-à-dire égal à $\frac{1}{\sqrt{\Sigma m r^2}}$, le lieu de tous les points ainsi déterminés sur les différentes droites sera un ellipsoïde qu'on désigne ordinairement sous le nom d'ellipsoïde central quand le point choisi est le centre de gravité du corps.

Les axes principaux de l'ellipsoïde central s'appellent les axes principaux d'inertie du solide :

Ils jouissent de propriétés remarquables que nous n'avons pas besoin d'énumérer ici.

DEUXIÈME SECTION

RAPPEL DES NOTIONS DE PHYSIQUE

Nous allons maintenant résumer les différentes notions de physique qui nous seront nécessaires. Nous renverrons tous les lecteurs qui trouveraient cet exposé trop succinct aux divers traités de physique publiés dans ces dernières années et, en particulier, à celui de M. Jamin, membre de l'Institut.

CHAPITRE PREMIER

DÉFINITIONS. — NOTATIONS. — CONVENTIONS

Aimants naturels et artificiels. — Les anciens connaissaient la propriété qu'avaient certains minerais de fer d'attirer le fer et quelques autres substances. On appela ces minerais *pierres d'aimant,* on les appelle aujourd'hui aimants *naturels* pour les distinguer de ceux que l'on obtient en soumettant des barreaux d'acier soit à l'action d'autres aimants, soit à celle de courants électriques puissants.

Fluide magnétique. — Comme on ne peut trouver dans un barreau d'acier qu'on a aimanté aucune différence de composition chimique ou de poids avant et après l'aimantation, on a attribué la propriété qu'il possède alors d'attirer le fer à un fluide impondérable qu'on appelle fluide magnétique.

Pôles. — Ligne neutre. — Si on roule un barreau aimanté dans de la limaille de fer, on constate que la limaille s'attache principalement aux deux extrémités, tandis qu'il n'y en a presque pas au milieu du barreau. On appelle *pôles* les centres particuliers d'action constatés aux deux extrémités, et *ligne neutre* la ligne médiane où l'attraction ne s'est pas manifestée.

Supposons un barreau aimanté suspendu de façon qu'il puisse se mouvoir librement, et présentons-lui successivement les deux pôles d'un autre barreau, nous constaterons qu'il y a attraction dans un cas, répulsion dans l'autre. Il y a donc une différence entre les deux extrémités d'un aimant.

Dans des aimants différents on appelle pôles de même nom ceux qui agissent de la même manière sur le même pôle d'un aimant mobile, pôles de nom contraire ceux qui exercent des actions opposées, et les faits précédents s'exposent alors ainsi :

Dans les aimants, nous avions imaginé un fluide pour expliquer les actions magnétiques ; puisque les deux pôles ont des propriétés opposées, nous admettrons qu'elles sont dues à deux fluides différents, et en disant que chacun de ces fluides agit par répulsion sur le fluide de même espèce et par attraction sur le fluide de nom contraire, nous n'aurons fait qu'exprimer autrement la loi des pôles trouvée par l'expérience ; seulement, cette conception hypothétique nous permettra de donner tout à l'heure aux pôles une définition précise.

Quel nom donnerons-nous à ces pôles ou fluides différents?

Nous nous adresserons pour cela à l'action que la terre exerce sur les aimants. Si, en effet, nous suspendons un barreau aimanté de manière qu'il puisse se mouvoir librement, et que nous l'abandonnions ensuite à lui-même, nous verrons qu'il prendra une direction déterminée à laquelle il reviendra si on l'en écarte.

Si on change, par exemple, les pôles bout pour bout, après un instant ils auront repris leur première position. La direction fixe de l'aiguille aimantée, connue depuis longtemps, fut attribuée par Gilbert à l'action de la terre, et, depuis lors, tous les faits connus ayant confirmé cette hypothèse, on a admis que la terre se comportait comme le ferait un aimant. On a, dès lors, donné l'épithète de boréal au fluide et au pôle de l'aimant terrestre contenus dans l'hémisphère nord, tandis que l'on donnait celle d'austral au fluide et au pôle contenus dans l'hémisphère sud.

D'après la loi de répulsion et d'attraction des fluides et pôles de même nom ou de nom contraire, il est clair que, dans un aimant suspendu et s'orientant librement à la surface du globe, il existe du fluide et un pôle austral dans l'extrémité qui se dirige vers le nord ; du fluide et un pôle boréal dans l'extrémité qui se dirige vers le sud.

Dénomination des pôles. — Conventions faites dans cet ouvrage. — Il y a donc ainsi, pour tous les aimants situés à la surface du globe et s'orientant par l'action de ce dernier, contradiction entre le nom des fluides ou pôles contenus dans chaque extrémité et celui du point cardinal vers lequel cette extrémité se dirige. Dans beaucoup d'auteurs français, on a voulu faire disparaître cette contradiction en donnant aux pôles des aimants le nom du point cardinal vers lequel ce pôle se dirige, mais il faut alors se rappeler que le pôle nord d'un aimant contient du fluide austral, et il y a ainsi contradiction entre les noms des pôles et des fluides qui se trouvent dans la même extrémité du barreau.

D'ailleurs, si bien prévenu que l'on soit de ce que représente au juste cette dernière convention, elle finit presque toujours par conduire à une équivoque ou à une erreur, parce qu'elle n'est pas conforme à la réalité des faits et ne s'accorde pas avec les conventions précédemment faites.

Pour éviter toute ambiguïté, nous adopterons dans cet ouvrage la convention faite par sir Airy et qui tend à se généraliser. Nous supposerons que les deux fluides contenus dans les hémisphères magnétiques, qui coïncident à peu de chose près avec les hémisphères terrestres, soient affectés de deux couleurs distinctes : bleu pour le fluide boréal ou contenu dans l'hémisphère nord; rouge pour le fluide austral ou contenu dans l'hémisphère sud. Cela posé, nous supposerons chacune des deux moitiés d'un aimant peinte avec la couleur indiquant la nature du fluide qu'elle contient; ainsi l'extrémité peinte en rouge contiendra du fluide austral, un pôle austral, et se dirigera vers le nord quand l'aimant sera librement suspendu, tandis que l'extrémité peinte en bleu contiendra du fluide boréal, un pôle boréal, et se dirigera vers le sud.

Conventions pour les lettres employées dans les figures. — Dorénavant dans nos figures nous désignerons les extrémités des aimants ou des tiges de fer doux aimantées, soit par la première lettre du nom du fluide que contient cette extrémité, soit par la première lettre du point cardinal vers lequel cette extrémité se dirige, soit encore par la première lettre de la couleur adoptée plus haut pour le fluide contenu dans cette partie du barreau; ainsi, nous réserverons les lettres A, *n* ou *r* pour l'extrémité nord d'une aiguille aimantée suspendue librement; tandis que les lettres B, *s* ou *b* désigneront l'extrémité sud de la même aiguille.

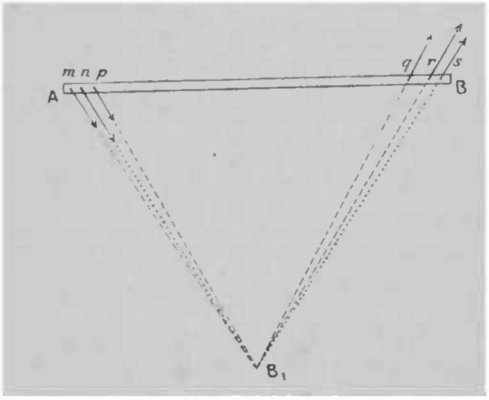


Fig. 11.

Définition précise des pôles (*fig.* 11). — Prenons donc un barreau aimanté AB et examinons l'action d'une molécule de fluide boréal située en B_1. Il est évident que cette molécule attirera toutes les molécules *m, n, p,* etc.... de fluide austral situées dans l'extrémité A, qu'elle repoussera au contraire toutes les molécules *q, r, s,* etc., du fluide boréal situées en B.

On pourra représenter l'attraction ou la répulsion qu'éprouve une des molécules du barreau en portant sur la ligne qui la joint au point B_1, vers B_1 ou en sens contraire suivant qu'il y a attraction ou répulsion, une ligne proportionnelle à la grandeur de la force attractive ou répulsive. Supposons maintenant que la molécule B_1 soit suffisamment éloignée du barreau AB pour qu'on puisse négliger la longueur de celui-ci vis-à-vis des distances B_1A et B_1B ; alors toutes ces forces attractives ou répulsives deviendront parallèles entre elles, et la mécanique nous apprend que toutes les forces de même nom peuvent dès lors se composer en une seule appliquée en un point dont la position ne changera pas si B_1 se déplace de façon que la condition précédente soit toujours remplie. C'est ce point d'application de la résultante commune qu'on appelle *pôle*.

CHAPITRE II

LOIS DES ACTIONS MAGNÉTIQUES. — MAGNÉTISME INDUIT

Coulomb a démontré par l'expérience et de deux façons différentes que la force magnétique attractive ou répulsive qui s'exerce entre le pôle d'une aiguille aimantée aussi courte que possible (de façon qu'on puisse négliger sa longueur par rapport à sa distance à l'aimant qui l'influence), et le pôle de même nom ou de nom contraire d'un barreau aimanté, est inversement proportionnelle au carré de la distance qui sépare les deux pôles. L'identité de cette loi des distances avec celle que Newton a obtenue pour la gravitation et celle qui règle les actions électriques, a conduit à la compléter pour la rendre semblable à ces deux dernières lois.

Nous dirons donc que deux masses magnétiques m et m' s'attirent ou se repoussent en raison inverse du carré de leurs distances et proportionnellement aux masses, c'est-à-dire au produit mm'. Si donc on appelle F la force qui s'exerce entre ces masses, nous aurons : $F = f\frac{mm'}{d^2}$, f étant un coefficient constant qu'on déterminera une fois pour toutes par l'expérience.

L'exactitude de cette loi, obtenue par les hypothèses et la généralisation que nous venons d'indiquer, se démontre à posteriori par l'accord des conséquences que la théorie en déduit avec les expériences que l'on réalise pour les contrôler.

Mais il est bien clair que nous ne pourrons appliquer cette loi que dans des circonstances identiques à celles qui nous ont permis de la formuler, à savoir, quand la longueur de l'aimant que nous considérons peut être négligée relativement à la distance qui le sépare de l'aimant qui l'influence.

Quand il en est ainsi, en vertu de la loi des distances, il est bien évident que les deux résultantes fictives, parallèles et de sens contraire, que nous supposons respectivement appliquées aux deux pôles de l'aimant influencé, sont égales entre elles, et que par suite leur ensemble forme ce que nous avons appelé *un couple.*

L'expérience a montré que pour les aiguilles aimantées d'une longueur de quelques centimètres qu'on emploie d'ordinaire, on peut sans erreur sensible considérer leurs pôles comme distants respectivement de l'extrémité voisine de $\frac{1}{12}$ de la longueur de l'aiguille.

Action directrice de la terre sur les aimants. — Prenons un aimant AB et examinons l'action que la terre exercera sur cet aimant.

L'expérience a prouvé que l'on pouvait sans erreur sensible pour la pratique assimiler la terre à un aimant très énergique, dont le centre serait situé au centre de la terre, dont les pôles seraient très près de ce centre et dont la direction coïnciderait avec celle d'un diamètre terrestre très voisin de l'axe de la rotation terrestre.

S'il en est ainsi, il est évident que nous sommes dans un cas où nous pouvons appliquer la loi précédente, puisque la longueur de notre aimant, 20 à 30 centimètres au maximum, est tout à fait négligeable par rapport au rayon terrestre, qui a 6 millions de mètres de longueur environ.

Désignons par A_1 et B_1 les pôles de cet aimant terrestre. Le pôle A et le pôle B de notre aimant éprouveront du pôle B_1 de l'aimant terrestre, deux actions, l'une attractive A*b*, l'autre répulsive B*b*, qui seront parallèles, égales et de sens contraire, puisqu'on peut considérer B_1 comme étant à une distance infinie de AB ; il en sera de même pour les deux forces émanées de A_1 c'est-à-dire pour A*a* et B*a*.

Enfin, en composant en une seule les deux forces qui s'exercent en A, et de même celles qui s'exercent en B, on obtiendra évidemment deux résultantes qui, comme leurs composantes respectives, seront parallèles, égales et de sens contraire. — Ainsi la terre, en agissant sur un aimant placé à sa surface, donne naissance à un couple, et un pareil système aura pour seul effet d'orienter le barreau aimanté, de le faire tourner sur lui-même et nullement de le déplacer à la surface du globe.

L'expérience vérifie cette conclusion, car, si on met dans une auge remplie d'une eau tranquille un flotteur de liège supportant un aimant, on constate que le flotteur pivote sur lui-même jusqu'à ce que l'aimant se soit dirigé conformément à la loi des pôles, mais qu'il ne se déplace pas à la surface de l'eau.

Action des aimants sur le fer doux. — Force inductrice. — Magnétisme induit. — Les phénomènes sont différents, quand, au lieu d'examiner l'action de la terre ou des aimants sur d'autres aimants, on cherche l'influence qu'ils exercent sur des morceaux de fer qu'on n'a pas préalablement aimantés et de l'espèce désignée habituellement sous le nom de fer doux. On appelle ainsi, soit le fer malléable bien pur et bien recuit qui n'a été soumis à aucune action mécanique après son refroidissement, soit le fer fondu.

Quand on approche un morceau de fer de cette espèce, d'un aimant, on constate qu'il donne des traces d'aimantation par cette seule approche et sans avoir même touché ce dernier. On dit alors qu'il a été aimanté par induction; et on appelle magnétisme induit, le magnétisme qu'il a ainsi contracté. L'aimant qui a exercé cette influence s'appelle aimant inducteur, et on donne le nom de force inductrice à l'action qu'il exerce.

Ainsi, soit AB un aimant, A'B' une tige de fer doux qu'on approche très près de l'aimant ou qu'on met en contact avec lui, on constate que cette tige devient elle-même un aimant avec une ligne neutre et deux pôles déterminés conformément à la loi des pôles. Ainsi le pôle B de l'aimant inducteur donne au morceau de fer doux un pôle induit A', de nom contraire à B, à son extrémité la plus voisine de B; et un pôle induit B' à l'autre extrémité.

A son tour, A'B' agira suivant la même loi sur un deuxième morceau de fer doux qu'on soumettra à son influence, et lui donnera des pôles A'' et B'' et ainsi de suite. Si on enlève brusquement l'aimant AB, tous les morceaux de fer doux se séparent les uns des autres, ce qui prouve que leur aimantation a disparu.

Action des aimants sur l'acier. — Force coercitive. — Si, au contraire, A'B' est un barreau d'acier, on constate qu'il ne devient un aimant qu'au bout d'un certain temps, mais dès qu'il l'est devenu il reste aimanté, quand on éloigne l'aimant inducteur AB. Pour exprimer la difficulté que semblent éprouver les fluides, soit pour se séparer, soit pour se réunir dans l'acier, on dit que ce dernier possède une force coercitive, et il faut entendre simplement par ce mot la résistance toute spécifique opposée par l'acier au mouvement des fluides. Cette force est d'autant plus intense que la trempe de l'acier est plus dure. Le fer doux, le fer fortement recuit, n'ont pas de force coercitive ; cependant on peut leur en communiquer par l'oxydation ou par une action mécanique quelconque, martelage, torsion, etc.

Action de la chaleur sur les aimants. — En chauffant un aimant, son magnétisme diminue à mesure que sa température augmente, et disparaît presque complètement à une température plus ou moins élevée. Le refroidissement ne fait pas reparaître ce magnétisme, si la température a dépassé une certaine limite.

Aimantation par l'action de la terre. — Puisque la terre se comporte comme un aimant, elle aimantera l'acier ou le fer doux qui se trouvent à sa surface, et le sens de cette aimantation sera toujours déterminé par la loi des pôles. Pour que l'aimantation de l'acier soit sensible, il faudra, d'après ce que nous venons de voir, qu'il soit resté un certain temps dans la même position : au contraire, le fer doux s'aimantera très rapidement, mais son aimantation variera comme sa position, à moins qu'on n'ait réussi à lui donner de la force coercitive par une action mécanique quelconque, tandis qu'il occupait une position déterminée ; mais nous reviendrons avec détail sur cette action dont l'étude est l'objet même de ce livre, quand nous aurons résumé ce que l'on sait actuellement sur le magnétisme terrestre.

CHAPITRE III

DU MAGNÉTISME TERRESTRE

Couple terrestre. — Nous avons vu précédemment que la terre agissant sur un aimant donnait naissance à un couple. Toute une branche de la physique est consacrée à l'étude du Magnétisme terrestre, c'est-à-dire à la recherche de la direction et de la grandeur des forces qui composent ce couple.

Si on pouvait réaliser un système de suspension tel, qu'une aiguille aimantée fût absolument libre de pivoter dans tous les sens autour de son centre de gravité maintenu fixe, la direction de cette aiguille arrivée à sa position d'équilibre nous donnerait évidemment la direction des forces du couple, et nous aurions ainsi résolu la première partie du problème.

Malheureusement un pareil système de suspension est trop difficile à réaliser, et, pour trouver seulement la direction des forces du couple, on est obligé de décomposer ce problème en deux autres.

Imaginons que nous prenions une aiguille aimantée, soutenue par un pivot vertical de telle façon qu'elle ne puisse se mouvoir que dans un plan horizontal. Décomposons maintenant chacune des forces du couple qui agit sur cette aiguille en deux composantes, l'une verticale, l'autre horizontale, nous aurons ainsi remplacé le couple unique par deux couples composants, situés l'un dans le plan horizontal, l'autre dans un plan vertical. Neutralisons l'action des composantes verticales sur l'aiguille par un contre-poids, alors les forces horizontales agiront seules pour la déplacer et l'orienter suivant leur propre direction. Quand l'aiguille sera en équilibre, nous serons assurés que le plan vertical qui contient son axe de figure est celui dans lequel s'exerce le couple terrestre.

Méridien magnétique. — Déclinaison. — L'observation montre que ce plan qu'on appelle méridien magnétique ne coïncide pas avec le méridien géographique du lieu. L'angle de ces deux plans verticaux est mesuré par l'angle que fait la ligne Nord-Sud vraie avec l'axe de l'aiguille aimantée, et s'appelle la *Déclinaison* de celle-ci; on donne quelquefois à cet angle le nom de *Variation*, mais nous ne nous servirons pas de cette expression, que nous réservons pour un autre usage.

On dit que la déclinaison est occidentale ou orientale, Ouest ou Est, et on lui donne le signe — ou le signe + suivant que la pointe Nord de l'aiguille aimantée tombe à l'Ouest ou à l'Est du Nord géographique ou vrai.

Inclinaison. — Le plan vertical dans lequel se trouve le couple terrestre étant ainsi déterminé, prenons une aiguille aimantée munie d'un axe passant par son centre de gravité et perpendiculaire à ses faces. Si nous soutenons cet axe horizontalement et que nous le placions perpendiculairement au plan du méridien magnétique, on voit que l'aiguille qui peut décrire un plan perpendiculaire à l'axe, se mouvra justement dans ce méridien. Tout se passe aimant qu'au bout d'un certain temps, mais dès qu'il l'est devenu il reste aimanté, quand on éloigne l'aimant inducteur AB. Pour exprimer la difficulté que semblent éprouver les fluides, soit pour se séparer, soit pour se réunir dans l'acier, on dit que ce dernier possède une force coercitive, et il faut entendre simplement par ce mot la résistance toute spécifique opposée par l'acier au mouvement des fluides. Cette force est d'autant plus intense que la trempe de l'acier est plus dure. Le fer doux, le fer fortement recuit, n'ont pas de force coercitive ; cependant on peut leur en communiquer par l'oxydation ou par une action mécanique quelconque. martelage, torsion, etc.

Action de la chaleur sur les aimants. — En chauffant un aimant, son magnétisme diminue à mesure que sa température augmente, et disparaît presque complètement à une température plus ou moins élevée. Le refroidissement ne fait pas reparaître ce magnétisme, si la température a dépassé une certaine limite.

Aimantation par l'action de la terre. — Puisque la terre se comporte comme un aimant, elle aimantera l'acier ou le fer doux qui se trouvent à sa surface, et le sens de cette aimantation sera toujours déterminé par la loi des pôles. Pour que l'aimantation de l'acier soit sensible, il faudra, d'après ce que nous venons de voir, qu'il soit resté un certain temps dans la même position : au contraire, le fer doux s'aimantera très rapidement, mais son aimantation variera comme sa position, à moins qu'on n'ait réussi à lui donner de la force coercitive par une action mécanique quelconque, tandis qu'il occupait une position déterminée ; mais nous reviendrons avec détail sur cette action dont l'étude est l'objet même de ce livre, quand nous aurons résumé ce que l'on sait actuellement sur le magnétisme terrestre.

CHAPITRE III

DU MAGNÉTISME TERRESTRE

Couple terrestre. — Nous avons vu précédemment que la terre agissant sur un aimant donnait naissance à un couple. Toute une branche de la physique est consacrée à l'étude du Magnétisme terrestre, c'est-à-dire à la recherche de la direction et de la grandeur des forces qui composent ce couple.

Si on pouvait réaliser un système de suspension tel, qu'une aiguille aimantée fût absolument libre de pivoter dans tous les sens autour de son centre de gravité maintenu fixe, la direction de cette aiguille arrivée à sa position d'équilibre nous donnerait évidemment la direction des forces du couple, et nous aurions ainsi résolu la première partie du problème.

Malheureusement un pareil système de suspension est trop difficile à réaliser, et, pour trouver seulement la direction des forces du couple, on est obligé de décomposer ce problème en deux autres.

Imaginons que nous prenions une aiguille aimantée, soutenue par un pivot vertical de telle façon qu'elle ne puisse se mouvoir que dans un plan horizontal. Décomposons maintenant chacune des forces du couple qui agit sur cette aiguille en deux composantes, l'une verticale, l'autre horizontale, nous aurons ainsi remplacé le couple unique par deux couples composants, situés l'un dans le plan horizontal, l'autre dans un plan vertical. Neutralisons l'action des composantes verticales sur l'aiguille par un contre-poids, alors les forces horizontales agiront seules pour la déplacer et l'orienter suivant leur propre direction. Quand l'aiguille sera en équilibre, nous serons assurés que le plan vertical qui contient son axe de figure est celui dans lequel s'exerce le couple terrestre.

Méridien magnétique. — Déclinaison. — L'observation montre que ce plan qu'on appelle méridien magnétique ne coïncide pas avec le méridien géographique du lieu. L'angle de ces deux plans verticaux est mesuré par l'angle que fait la ligne Nord-Sud vraie avec l'axe de l'aiguille aimantée, et s'appelle la *Déclinaison* de celle-ci; on donne quelquefois à cet angle le nom de *Variation*, mais nous ne nous servirons pas de cette expression, que nous réservons pour un autre usage.

On dit que la déclinaison est occidentale ou orientale, Ouest ou Est, et on lui donne le signe — ou le signe + suivant que la pointe Nord de l'aiguille aimantée tombe à l'Ouest ou à l'Est du Nord géographique ou vrai.

Inclinaison. — Le plan vertical dans lequel se trouve le couple terrestre étant ainsi déterminé, prenons une aiguille aimantée munie d'un axe passant par son centre de gravité et perpendiculaire à ses faces. Si nous soutenons cet axe horizontalement et que nous le placions perpendiculairement au plan du méridien magnétique, on voit que l'aiguille qui peut décrire un plan perpendiculaire à l'axe, se mouvra justement dans ce méridien. Tout se passe donc comme si, le couple horizontal ayant d'abord placé l'aiguille dans le méridien magnétique, elle était soumise dans ce plan à l'action du couple vertical, c'est-à-dire qu'en somme elle se meut sous l'influence du couple terrestre et que sa position d'équilibre donne la direction des forces de ce couple.

L'angle que l'axe de figure de l'aiguille aimantée dans cette position d'équilibre fait avec l'horizontale s'appelle *l'Inclinaison;* on la compte, dans le plan vertical, de 0° à 90° à partir de l'horizontale. D'après la loi des pôles dans notre hémisphère nord, l'extrémité de l'aiguille d'inclinaison la plus rapprochée de la terre doit être un pôle austral et par suite pointer vers le Nord. L'expérience justifie cette conclusion.

Si la conception d'un aimant terrestre constant en grandeur et en intensité était une réalité, la déclinaison et l'inclinaison seraient des quantités constantes dans un même lieu et subissant seulement les variations accidentelles et passagères, que leur imprimeraient des phénomènes météorologiques, tels que tonnerre, aurore boréale, etc... Mais les observations plusieurs fois séculaires qu'on a de ces deux quantités montrent, au contraire, qu'elles sont éminemment variables, c'est-à-dire que le magnétisme terrestre est dans un état de fluctuation continuelle. Si donc nous nous servons encore de notre hypothèse d'aimant terrestre, il ne faudra pas oublier que c'est pour la commodité du raisonnement et du calcul, mais que cet aimant doit être considéré comme variant de position et d'intensité avec le temps.

Variations de la déclinaison et de l'inclinaison. — Elles sont dites séculaires, annuelles ou diurnes, suivant le laps de temps pendant lequel on les considère.

La déclinaison à Paris, au XVI^e siècle, était orientale; en 1663, elle était nulle, elle devint ensuite occidentale et y atteignit un maximum de 22° 22′ en 1825. Depuis cette époque elle diminue graduellement et l'aiguille aimantée retourne vers l'Orient.

Dans la région du globe occupée par la France, cette diminution de la déclinaison est de 6′ à 8′ par an. Il est donc essentiel, quand on fait usage d'une déclinaison donnée par un livre ou par une carte, de bien savoir l'année à laquelle se rapporte cette valeur, afin de tenir compte de la correction correspondante au laps de temps écoulé.

L'inclinaison, beaucoup plus délicate à observer, a été moins bien étudiée. On sait qu'elle a constamment diminué à Paris, depuis qu'on l'observe : de 75° sa valeur en 1661, elle est passée à 65° 32′ en 1878.

En réunissant toutes les observations de déclinaison et d'inclinaison faites en différents points de la terre, en les discutant avec soin et en essayant d'obtenir le plus exactement possible les corrections nécessaires pour les ramener à une même époque, on a pu, en réunissant les points du globe où ces quantités avaient une même valeur, tracer sur la surface du globe un double réseau de lignes.

Les unes sont appelées lignes d'égale déclinaison ou lignes isogoniques.

Les autres lignes d'égale inclinaison ou lignes isocliniques ou encore isoclines.

Lignes d'égale déclinaison. — Cartes. — On trouvera à la fin de ce volume une carte donnant les valeurs de la déclinaison dans les différents points du globe pour l'année (1880). Elle vient d'être publiée par l'*Amirauté anglaise,* et nous la devons à l'obligeance de M. le Staff-Commander E. W. Creak par qui elle a été dressée. Les courbes pleines se rapportent aux déclinaisons Ouest. — Les courbes en trait interrompu aux déviations Est.

On a choisi comme système de projection celui de Mercator, parce qu'il est employé universellement par les marins, mais on se rend mieux compte de leur disposition dans le système des projections stéréographiques faites sur l'équateur, employées par le navigateur français Duperrey. (V. Planche V.)

Pôles magnétiques terrestres. — Sur ce dernier système, on voit les courbes converger assez nettement, dans l'hémisphère Nord vers un point situé par 100° de longitude Ouest et 70° de latitude Nord, et dans l'hémisphère Sud vers un point situé par 14° de longitude Est et 73° de latitude Sud. Mais il ne faut pas oublier que les observations manquent dans les environs des deux pôles terrestres, et qu'on a dû tracer les lignes hypothétiquement dans ces régions. En examinant attentivement ces cartes stéréographiques, on voit encore une sorte de tendance des courbes à converger vers un point situé par 145 ou 150° de longitude Est et 80° de latitude Nord; à chaque pôle magnétique, l'aiguille d'inclinaison est verticale, et l'aiguille de déclinaison est en équilibre dans un azimut quelconque. Y a-t-il cependant plusieurs pôles magnétiques par hémisphère?

Telle est la question que se sont posée fréquemment les physiciens. Halley puis Hansteen affirmaient, mais sans preuves bien convaincantes, qu'il y en a quatre, deux par hémisphère. — Gauss, par la théorie, arriva à cette conclusion que, s'il y a dans l'hémisphère *Nord* deux pôles magnétiques, il y en a nécessairement un troisième où l'aiguille du compas n'aurait aucune tendance à s'orienter et où l'aiguille d'inclinaison se tiendrait verticale avec son pôle austral en bas.

Il n'y aurait aucune convergence des lignes de déclinaison vers ce troisième pôle; ce serait plutôt, à proprement parler, un pôle de divergence.

Mais lors bien même qu'il serait complètement établi qu'il n'y a actuellement que deux pôles magnétiques, un dans chaque hémisphère, on n'aurait nullement le droit d'en conclure qu'antérieurement il n'en existait pas davantage. Halley avait quelque raison de croire à un second pôle magnétique Nord; car les observations des navigateurs entre 1616 et 1680 montrent une déclinaison Ouest considérable dans la baie d'Hudson et le détroit de Smith, alors qu'en Angleterre la déclinaison était nulle. Il se pourrait donc que la tendance des lignes de déclinaison à converger vers un point de la mer inexplorée qui se trouve au nord de la Sibérie, fût due à l'influence sans cesse décroissante d'un pôle magnétique Nord ayant existé antérieurement.

Recommandation pratique. — La carte d'égale déclinaison est nécessaire pour permettre au marin de passer rapidement de la variation observée à la déviation du compas.

Elle a encore une autre utilité, en lui indiquant, par le plus ou moins grand nombre de courbes qui se pressent dans un étroit espace, les régions du globe où il faut suivre son compas avec le plus grand soin, par exemple, la Manche et ses approches, les côtes de l'Amérique du Nord, Terre-Neuve, le golfe et le fleuve du Saint-Laurent. Cette dernière région est peut-être la plus dangereuse de toutes, car une faible intensité des composantes horizontales du globe, s'y trouvant combinée avec des valeurs considérables de l'inclinaison, met les compas des navires venant des latitudes inférieures dans des conditions qui produisent de forts changements dans la déviation du compas (voyez p. 63).

Courbes d'égale inclinaison. — On trouvera également à la fin du volume une carte donnant les courbes d'égale inclinaison que nous empruntons à l'édition de 1874 du *Manuel de l'Amirauté an-*

glaise pour les déviations des compas. On a joint, par un trait plein, les points du globe où l'extrémité inférieure de l'aiguille d'inclinaison est celle qui pointe vers le nord, et par un trait ponctué les points où, au contraire, l'extrémité inférieure est celle qui se dirige vers le sud.

Les chiffres placés en marge de cette carte indiquent les valeurs des tangentes naturelles de l'inclinaison qui correspondent respectivement à chacune des courbes, valeurs dont nous aurons besoin plus tard. (V. planche IV.)

Équateur magnétique. — En examinant ces courbes, on trouvera qu'elles offrent avec les parallèles terrestres une certaine analogie; c'est pour cela qu'on les appelle parfois lignes de latitude magnétique. La ligne où l'inclinaison est nulle, c'est-à-dire celle où l'aiguille d'inclinaison abandonnée à elle-même reste horizontale, coïncide à peu près avec l'équateur terrestre, et on l'a appelée par analogie *équateur magnétique.* Au nord de cet équateur magnétique, c'est la pointe nord de l'aiguille d'inclinaison qui est attirée vers le bas, c'est-à-dire qui est inférieure; au contraire, au sud de ce même équateur, c'est l'extrémité qui pointe vers le sud, ou le pôle boréal qui est le plus rapproché de la Terre.

L'inclinaison, qui est nulle à l'équateur, augmente quand on se dirige vers les pôles, où elle atteint 90 degrés. Mais la loi de son accroissement n'est pas aussi simple que celle de l'accroissement des latitudes terrestres.

Près de l'équateur magnétique, quand on s'avance vers les pôles magnétiques de 1 degré de latitude terrestre, l'inclinaison croît de 2 degrés environ. C'est le contraire dans les latitudes élevées, où l'inclinaison croît de 30 minutes seulement quand on parcourt 2 degrés environ de latitude terrestre.

CHAPITRE IV

INTENSITÉS DES FORCES MAGNÉTIQUES

Mesure des forces constantes. — 1re Méthode, dite des oscillations. — Nous venons de voir comment on détermine la direction des forces qui constituent le couple terrestre. Pour définir complètement ce dernier, il nous reste à obtenir la grandeur de l'une de ses forces, puisqu'elles sont égales entre elles. Or, l'aimant terrestre qui donne naissance au couple en question pouvant être considéré comme infiniment éloigné, il en résulte que si on écarte l'aiguille d'inclinaison de sa position d'équilibre, les forces magnétiques qui agissent pour ramener l'aiguille à cette position ne changent, ni en grandeur ni en direction, en un mot, restent constantes; nous pourrons donc déterminer leur grandeur au moyen de la méthode générale dite des oscillations, qui sert en physique à la mesure des forces constantes, et dont l'application la plus usuelle et la plus connue est celle qui se rapporte à l'évaluation de l'intensité de la pesanteur.

Application à la pesanteur. — Cette dernière se détermine, on le sait, au moyen de l'accélération qu'elle produit dans un lieu donné; accélération qu'on mesure en observant la durée de l'oscillation d'un pendule de longueur donnée.

On appelle oscillation d'un pendule le mouvement qu'il effectue pour aller de sa position d'écart maxima OA, à la position symétrique OA′ par rapport à la verticale.

Cela étant, on a, entre la durée de cette oscillation, la longueur l du pendule et l'accélération g de la pesanteur, la formule :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

qui donne la valeur de g en mètres si t est exprimé en secondes et l en mètres. La formule précédente ne doit s'appliquer qu'à des oscillations infiniment petites. Quand l'amplitude de ces oscillations est égale à 2α, la théorie donne pour le temps t_1 de leur durée, la formule :

$$t_1 = t\left[1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\frac{\alpha}{2} + \left(\frac{1.}{2.4}\right) \sin^4\frac{\alpha}{2} \ldots + \frac{1.3\ldots(2n-1)^2}{2.4\ldots 2n}\sin^{2n}\frac{\alpha}{2} + \qquad\right]$$ [1]

Pour $\alpha = 30^\circ$ on a $t_1 = 1{,}02\, t$.

Pour $\alpha = 90^\circ$ on a $t_1 = 1{,}2\ t$.

On voit donc que, pour toutes les valeurs de α inférieures à 30 degrés, la série entre parenthèses est extrêmement convergente, et qu'on peut, sans inconvénient, prendre dans la pratique t pour t_1 ce qui est plus commode pour le calcul.

Portons un même pendule dans deux points différents du globe et appelons g et g' les accélérations de la pesanteur en ces deux points.

1. Poisson, *Cours de mécanique.*

Comptons les nombres n et n' d'oscillations que le pendule fait dans ces deux lieux en un même temps T, nous aurons, dans le premier lieu :

$$T = n\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; \quad \text{et dans le second :} \quad T = n'\pi\sqrt{\frac{l}{g'}};$$

d'où :

$$\frac{g}{g'} = \frac{n^2}{n'^2};$$

et comme les forces sont proportionnelles aux accélérations qu'elles produisent, nous dirons que les intensités de la pesanteur en deux lieux différents sont proportionnelles aux carrés des nombres d'oscillations faites par un même pendule dans un même temps.

Si, au lieu d'observer dans les deux lieux les nombres d'oscillations faites dans le même temps, nous avions observé les temps différents T et T' mis par le pendule pour faire un même nombre n d'oscillations; nous aurions eu :

$$T = n\pi\sqrt{\frac{l}{g}}; \qquad T' = n\pi\sqrt{\frac{l}{g'}}; \quad \text{d'où :} \quad \frac{g}{g'} = \frac{T'^2}{T^2},$$

c'est-à-dire que les intensités de la pesanteur en deux lieux différents sont inversement proportionnelles aux carrés des temps pendant lesquels le pendule fait, en ces deux lieux, un même nombre d'oscillations.

Application aux forces magnétiques. — Prenons une aiguille d'inclinaison bien équilibrée, c'est-à-dire telle que son axe de suspension qui est horizontal passe exactement par son centre de gravité, de façon que la pesanteur n'intervienne pas dans la position qu'elle prendra autour de son axe.

Plaçons cet axe de suspension dans le plan est-ouest magnétique; il en résultera que l'aiguille pourra se mouvoir librement dans le méridien magnétique sous l'influence des deux forces du couple terrestre et s'orienter suivant la direction commune de ces deux forces. Écartons l'aiguille de cette position d'équilibre, puis laissons-la libre de nouveau; elle exécutera, pour revenir à sa position initiale, une série d'oscillations sous l'influence des deux forces du couple terrestre qui restent toujours constantes en grandeur et en direction.

Puisque les deux extrémités se meuvent sous l'action de forces identiques, considérons seulement le mouvement de la pointe inférieure de l'aiguille, celle qui est dirigée vers le nord. Au pôle magnétique de cette extrémité se trouve appliquée une force magnétique I, de grandeur et de direction constantes, nous pourrons donc appliquer au mouvement de ce point les formules précédentes données pour le pendule en y remplaçant g et g' par les valeurs des accélérations dues respectivement aux forces I et I'; et, puisque les forces sont proportionnelles aux accélérations qu'elles produisent, nous aurons finalement :

$$\frac{I}{I'} = \frac{T'^2}{T^2} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

en conservant les notations précédentes.

Tel est le principe de la méthode ; mais ce n'est pas ainsi qu'il est appliqué d'ordinaire, le maniement de l'aiguille d'inclinaison présentant des difficultés d'observation considérables. On comprend, en effet, qu'il soit très difficile de se procurer une aiguille exactement centrée, c'est-à-dire telle, que le centre de gravité soit exactement sur l'axe idéal de rotation et que la pesanteur n'intervienne pas dans la durée des oscillations. Cette difficulté vaincue, il resterait encore celle d'orienter exactement l'axe suivant la ligne EO magnétique.

Aussi préfère-t-on, en général, déterminer l'intensité du magnétisme terrestre en cherchant la valeur de l'une de ses composantes soit horizontale, soit verticale. En appelant H et Z ces deux composantes et θ l'angle d'inclinaison, on a évidemment :

$$H = I \cos \theta ;$$
$$Z = I \sin \theta ,$$

et l'on voit que la connaissance de l'angle θ et de l'une quelconque des composantes H ou Z suffit pour déterminer I.

Propriétés importantes de l'aiguille d'inclinaison. — Si on divise l'une par l'autre les deux équations précédentes, on obtient :

$$\operatorname{tang} \theta = \frac{Z}{H}.$$

Supposons maintenant que l'axe de rotation soit écarté de la direction E-O magnétique d'un angle α. Alors l'aiguille ne pourra se mouvoir que dans un plan vertical faisant l'angle α avec le méridien magnétique. Voyons quel sera l'angle qu'elle fera dans ce plan avec l'horizontale, lorsqu'elle sera en repos.

Considérons le pôle de l'extrémité inférieure de l'aiguille, il est toujours soumis à la force I, ou, ce qui revient au même, aux deux composantes de cette force Z et H.

Mais cette dernière force qui est, ne l'oublions pas, parallèle au méridien magnétique, peut elle-même se décomposer en deux autres, l'une $H\cos\alpha$ dirigée dans le plan d'oscillation de l'aiguille, l'autre $H\sin\alpha$ dirigée perpendiculairement à ce plan, qui n'intervient dans le mouvement qui s'effectue dans ce plan que pour modifier les actions qui s'exercent entre l'axe de l'aiguille et ses supports. Par conséquent, les seules forces qui orientent l'aiguille dans le plan vertical où elle se meut sont $H\cos\alpha$ et Z, et, si nous appelons i' l'angle que fait l'aiguille avec l'horizon dans sa position d'équilibre, nous aurons évidemment, puisque l'aiguille indique la direction de la résultante des deux forces précédentes :

$$tg\, i' = \frac{Z}{H\cos\alpha}.$$

Cette formule nous donne trois conséquences importantes : 1° Quand $\alpha = 0$, c'est-à-dire quand l'axe de rotation se trouve dans le plan est-ouest magnétique, $\cos\alpha$ est maximum, et par suite la valeur correspondante de i est un minimum. Ainsi, ce que nous avons appelé « inclinaison » d'une aiguille aimantée mobile autour d'un axe horizontal est l'angle minimum que cette aiguille fait avec l'horizon quand l'axe se déplace dans le plan horizontal pour occuper toutes les directions possibles;

2° Quand $\alpha = 90$, c'est-à-dire quand l'axe se trouve dans le méridien magnétique et que l'aiguille se meut, par conséquent, dans le plan est-ouest magnétique, $\cos\alpha$ est minimum, par suite i maximum et égal à 90 degrés.

Ceci donne un moyen de trouver la direction du méridien magnétique sans le secours de l'aiguille de déclinaison;

3° Si on fait tourner l'axe de suspension de 90 degrés de façon qu'il fasse avec le méridien magnétique un angle de $90 + \alpha$, on aura pour l'angle i'' que fait alors l'aiguille avec l'horizontale :

$$tg\, i'' = \frac{Z}{H\cos(90+\alpha)};$$

d'où :

$$\frac{1}{tg^2 i'} + \frac{1}{tg^2 i''} = \frac{1}{tg^2 i}.$$

Par conséquent, pour avoir la valeur *de l'inclinaison*, il n'y a pas besoin de chercher la direction du méridien magnétique; il suffit d'observer l'angle que l'aiguille aimantée fait avec l'horizon dans deux plans rectangulaires entre eux.

M. le lieutenant de vaisseau Joseph Peichl, de la Marine Impériale et Royale autrichienne, a fondé, sur les propriétés de l'aiguille d'inclinaison, un ingénieux appareil qu'il a appelé « Control-Compass » et qui sert à rectifier à la fois les routes et la compensation du compas étalon.

Détermination du rapport des composantes horizontales magnétiques dans deux lieux différents. — Les détails que nous venons de donner nous permettent de traiter ce point très brièvement. Il suffira évidemment pour cela de prendre une aiguille aimantée maintenue horizontale au moyen d'un faible contre-poids s'opposant à l'action des composantes verticales du couple terrestre et rendue mobile dans un plan horizontal au moyen d'une chape reposant sur un pivot vertical.

Il est clair que cette aiguille s'oriente dans le plan horizontal sous l'action des seules composantes horizontales; on aura donc, en la portant dans deux lieux différents et en l'écartant de sa position d'équilibre :

$$\frac{H}{H'} = \frac{I\cos\theta}{I\cos\theta'} = \frac{T'^2}{T^2} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

T et T', n et n' ayant la même signification que dans les paragraphes précédents.

Instrument et méthode d'observation. — L'instrument le plus convenable pour ces observations est une petite aiguille de 7 centimètres de longueur environ, renflée à son centre, pointue à ses deux extrémités, et dont le contour extérieur est semblable à celui de deux pyramides minces et allongées ayant une base commune. Cette aiguille doit être aussi mince que le comportent la solidité et la rigidité qui lui sont nécessaires; elle est munie d'un pivot particulier qu'on peut adapter dans la douille cylindrique qui reçoit en temps ordinaire celui du compas-étalon. Ce pivot ne doit servir qu'à elle, et, dès que les observations de force horizontale sont terminées, on doit le retirer pour mettre en place celui de la rose.

Pour faire une observation, on écarte, au moyen d'un barreau aimanté, l'aiguille de sa position d'équilibre, et, quand elle fait un angle d'environ 40 à 45 degrés, on la laisse libre et on compte le nombre des oscillations qu'elle effectue avant de revenir à sa position initiale.

On note également le temps qui s'est écoulé pendant la durée des oscillations.

On ramène, en général, les observations au temps nécessaire à dix oscillations par une simple proportion; si n est le nombre des oscillations et T leur durée, le temps d'une oscillation sera $\frac{T}{n}$ et celui de dix oscillations $\frac{10\,T}{n}$.

2ᵉ **Méthode, dite des écarts ou des déflexions.** — C'est l'application à la mesure des forces magnétiques du principe sur lequel le savant physicien français Pouillet avait construit, dès le commencement de ce siècle, l'instrument appelé boussole des sinus, au moyen duquel il mesurait l'intensité des courants électriques.

Voici le principe de cette nouvelle méthode d'observation.

Imaginons que la partie supérieure de la cuve du compas soit entourée, à la hauteur de l'aiguille environ, d'un anneau de cuivre mobile qui tourne autour du pivot de cette aiguille comme axe et porte à 180 degrés l'un de l'autre deux bras également en cuivre sur lesquels on peut mettre, soit un, soit plusieurs aimants, mais en même nombre et de même force, placés, d'ailleurs, symétriquement par rapport au centre de l'aiguille et se regardant par leurs pôles de noms opposés.

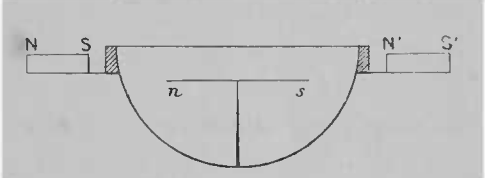


Fig. 12.

Supposons que cet anneau parte de la position indiquée dans la *fig.* 12 et qu'on le fasse tourner, l'aiguille du compas sera évidemment entraînée par les aimants perturbateurs et, par suite, sera déviée de sa position d'équilibre.

Arrêtons le mouvement de l'anneau au moment où les bras en cuivre sont sur la *direction perpendiculaire* à la position de l'aiguille déviée, et supposons que la force des aimants perturbateurs soit telle, que cette aiguille reste alors en équilibre dans une position faisant un angle α avec sa position primitive.

D'après ce que nous avons dit sur le mouvement d'un solide autour d'un axe vertical, nous savons que, puisqu'il y a équilibre, la somme des moments, par rapport à cet axe, des forces qui tendent à faire tourner l'aiguille, est nulle.

Puisque les forces qui agissent sur les deux pôles de l'aiguille sont égales et de sens contraire, il nous suffit de considérer l'un d'eux, le pôle rouge de l'aiguille, et nous aurons l'équation d'équilibre en écrivant que dans la seconde position d'équilibre de l'aiguille les moments des deux forces magnétiques qui s'exercent sur ce pôle sont égaux par rapport à l'axe de rotation de l'aiguille.

Or, si nous appelons H la composante horizontale terrestre au lieu où se trouve l'aiguille, m la masse magnétique idéale qui représente le magnétisme du pôle considéré de l'aiguille, l la demi-longueur de cette dernière, α l'angle qui existe entre ses deux positions d'équilibre, il est évident que le moment de la force qui tend à ramener l'aiguille dans sa première position d'équilibre est $m.\mathrm{H}.\,l \sin \alpha$.

D'autre part, en appelant F l'une des composantes du couple perturbateur exercé par les aimants, et en remarquant que, dans la seconde position d'équilibre, l'alidade est perpendiculaire à l'aiguille déviée, nous aurons pour l'expression du moment de cette force perturbatrice $m \mathrm{F}\, l$.

On a donc :

$$m.\mathrm{H}.\,l \sin \alpha = m.\mathrm{F}.\,l.$$

Transportons l'aiguille à bord, *sans changer la distance* des aimants, et imaginons que le cap reste constant pendant que nous exécuterons une observation semblable; nous aurons alors, en appelant H′ la force directrice horizontale qui oriente l'aiguille à bord, α' l'angle qui existe alors entre les deux positions d'équilibre :

$$m.\mathrm{H}'.\,l \sin \alpha' = m.\mathrm{F}.\,l.$$

D'où :

$$\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{H}'} = \frac{\sin \alpha'}{\sin \alpha}.$$

D'où ce théorème :

Le rapport des forces horizontales qui orientent l'aiguille d'un compas est égal au rapport inverse des sinus des déviations ou mieux des écarts imprimés à cette même aiguille par une force perturbatrice constante.

Nous garderons exclusivement le mot déviation pour l'angle que l'aiguille fait à bord avec le méridien magnétique dans sa position d'équilibre, et nous emploierons l'expression d'écart pour désigner la déviation particulière produite par des aimants perturbateurs placés à dessein auprès du compas.

Appareil de Sir E. Sabine. — Un instrument semblable, fondé sur ce principe, a été construit en 1849 par le lieutenant-général, alors lieutenant-colonel, Sir Edward Sabine. Dans une brochure fort intéressante imprimée à Londres dans la même année (brochure que je ne connaissais pas en 1870, lorsque j'écrivis l'introduction placée en tête de ma traduction de la troisième édition du *Manuel* *de l'Amirauté anglaise*), Sir Sabine expliqua comment on pouvait se servir de cet instrument pour trouver l'ensemble des deux termes qui représentent la partie semi-circulaire de la déviation.

Appareil du commandant Fournier. — Depuis, en 1871, M. le capitaine de vaisseau Fournier, alors lieutenant de vaisseau, fit construire un appareil analogue auquel il donna le nom d'*Alidade déviatrice.* Il expliqua la construction et le but de son appareil, d'abord dans des brochures publiées dans la même année, puis dans un traité publié en 1873, et montra par une analyse beaucoup plus développée que celle de Sir E. Sabine et toute différente, comment on pouvait, avec son aide, obtenir séparément les deux coefficients de la déviation semi-circulaire, et aussi un troisième coefficient, en général constant, qui forme la partie de beaucoup la plus importante de la déviation quadrantale. Nous reviendrons plus loin sur ce sujet.

L'importance de cette méthode est considérable car elle permet de régler ou de compenser le compas, en temps de brume, sans l'aide d'aucun relèvement.

Sir William Thomson a repris ce principe en 1878, en l'appliquant d'une façon un peu différente dans l'appareil suivant.

Déflecteur de Sir W. Thomson (*fig.* 12 *bis*). — Qu'on se figure deux paires de ciseaux (la figure n'en montre qu'une), placées verticalement l'une derrière l'autre, et se mouvant simultanément autour d'un axe de rotation commun *o*. Les parties supérieures des branches se rapprochent ou s'éloignent suivant que le mouvement de rotation de la vis *v* rapproche ou éloigne les écrous mobiles *e* auxquels elles sont reliées. Les extrémités inférieures des ciseaux se meuvent en suivant le plan horizontal SNP, tandis que l'axe de rotation commun se déplace dans une rainure verticale fixe destinée à guider son mouvement. Chacune des quatre branches inférieures des ciseaux porte un petit aimant. Ces aimants sont semblablement orientés sur les deux branches qui sont d'un même côté de la verticale, mais, comme le montre la figure, les pôles inférieurs des aimants portés par les deux branches d'une même paire de ciseaux sont de noms opposés. Les deux pôles N et les deux pôles S, placés de part et d'autre de la verticale, exercent sur l'aiguille de la rose une force perturbatrice dont la grandeur dépend de l'écartement qui leur a été donné au moyen de la vis *v*.

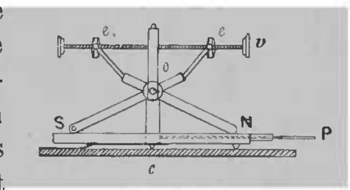


Fig. 12 *bis*.

Tout à l'heure nous avions des aimants perturbateurs dont la distance des pôles restait constante, tandis que l'on obtenait avec eux des écarts variables, ici nous ferons varier la distance des pôles de façon à obtenir un écart constant de 90 degrés, à terre et à bord.

En appelant F et F′ la force perturbatrice du déflecteur à bord et à terre on aura évidemment dans la première observation $H = F$ et dans la seconde $H' = F'$ puisque $\alpha = \alpha' = 90$ degrés.

D'où ce théorème : Pour l'écart constant de 90 degrés et quand les pôles des aimants perturbateurs, tout en changeant de distance, restent sur une perpendiculaire à la direction de l'aiguille déviée, les forces directrices qui orientent l'aiguille sont entre elles comme les forces perturbatrices produites par les aimants déviateurs.

Voici comment on opère :

On place l'instrument sur le couvercle du compas. On le centre sur l'axe vertical du compas au moyen du pivot *c* qu'on engage dans une crapaudine. Un long index de cuivre P que nous appellerons le pointeur indique la direction vers laquelle le déflecteur attire le Nord du compas. On place ce pointeur sur l'Est-quart-Nord de la rose, celle-ci se met immédiatement à tourner. L'observateur, saisissant le pointeur de la main droite, le maintient toujours sur l'E.-q.-N. de la rose en mouvement, tandis qu'avec la main gauche il manœuvre la vis qui règle l'écartement des aimants de telle façon que la rose s'arrête en équilibre après avoir tourné d'un angle de 90 degrés.

Le pointeur est mis sur l'E.-q.-N. et non pas sur l'Est de la rose déviée pour la commodité et la rapidité des observations.

L'écartement des aimants est donné par une échelle divisée adaptée à l'instrument.

La force perturbatrice correspondante à un écartement donné des aimants est déterminée à terre, on réunit ces diverses valeurs correspondantes aux diverses divisions de l'échelle dans une table.

On verra plus loin que, quand on se sert du déflecteur pour égaliser à tous les caps les forces directrices qui orientent l'aiguille, c'est-à-dire pour compenser les compas, il est inutile de se donner la peine de graduer le déflecteur.

Quoi qu'il en soit, on possède, on le voit, un second procédé pour avoir les rapports des forces directrices qui orientent une aiguille aimantée horizontale.

Détermination du rapport des forces magnétiques verticales. — 1re Méthode, dite des oscillations. — Instrument nécessaire pour l'appliquer. — Nous n'avons qu'à répéter ici ce que nous avons dit pour les composantes horizontales. Seulement, dans le cas qui nous occupe, l'aiguille aimantée ne doit être soumise qu'à l'action des composantes verticales et doit pouvoir lui obéir. Par suite, nous aurons besoin d'une aiguille mobile autour d'un axe horizontal, c'est-à-dire d'une aiguille d'inclinaison. Et, pour qu'elle soit mobile sous l'action de la seule force verticale terrestre, il faudra orienter l'axe horizontal suivant le méridien magnétique, de façon que l'aiguille oscille dans le plan Est-Ouest magnétique.

En observant dans deux lieux différents et en prenant les mêmes notations que précédemment, nous aurons :

$$\frac{Z}{Z'} = \frac{I \sin \theta}{I \sin \theta'} = \frac{T'^2}{T^2} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Quand on voudra se servir de l'aiguille à bord d'un navire, de façon à avoir les rapports des composantes verticales magnétiques à différents caps, il faudra avoir soin d'orienter d'abord l'appareil de façon que l'aiguille soit verticale; on est sûr alors que la force horizontale n'a aucune influence sur les oscillations faites par l'aiguille quand on l'écarte de sa position d'équilibre.

2e Méthode, dite de la balance d'inclinaison. — Sir W. Thomson a eu l'idée ingénieuse d'employer l'aiguille d'inclinaison d'une autre façon qui simplifie et abrège notablement les observations : Il en a fait une sorte de balance en l'observant, dans le méridien magnétique, quand elle est rendue horizontale au moyen d'un contre-poids.

Description de la balance d'inclinaison de Sir W. Thomson (*fig.* 12 *ter*). — Dans un cylindre de 8 centimètres environ de longueur sur 4 de diamètre, se trouve renfermée une aiguille aimantée *d*, mobile autour d'un axe *aa* qui lui est perpendiculaire et qui doit être horizontal pendant les observations. On constate que cette horizontalité est atteinte au moyen d'un petit niveau à bulle d'air *n* placé sur le cylindre. On arrive aisément, avec quelques minutes d'essai, à s'habituer à obtenir rapidement cette position, en tenant simplement l'instrument à la main.

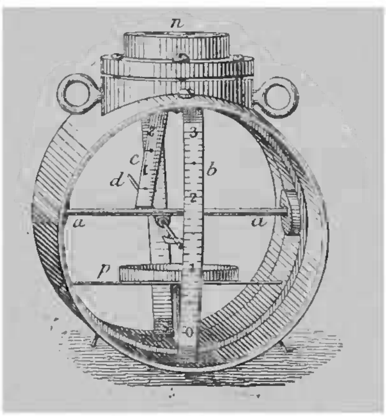


Fig. 12 *ter*.

Les extrémités de l'aiguille d'inclinaison se meuvent sur deux cercles gradués *b* placés dans le plan vertical passant par l'aiguille et qui est perpendiculaire à l'axe quand ce dernier est horizontal. Les divisions de ces cercles se lisent à travers des glaces mobiles qui ferment le cylindre pour empêcher les agitations de l'air de se transmettre à l'aiguille, mais qui peuvent se retirer pour permettre la mise en place et le déplacement d'un petit poids additionnel sur cette aiguille.

Une autre échelle *c*, inclinée pour qu'on puisse la lire facilement, est placée dans le sens de la longueur du cylindre. C'est elle qui donne la distance, à l'axe de suspension, du poids dont on charge l'aiguille afin qu'elle reste horizontale malgré l'action des composantes magnétiques verticales.

Le poids additionnel employé ordinairement est un simple morceau de papier percé par l'aiguille en deux endroits, et qu'on peut faire courir sur elle de façon que son milieu soit à différentes distances de l'axe; on le voit sur la figure près de l'échelle *b*.

Quand on ne sert pas de l'aiguille d'inclinaison, on fait monter le plateau indiqué en *p* de façon que l'aiguille au repos soit supportée et fixée par ce plateau.

On porte l'instrument à terre, dans une position libre de fer, et on place le poids additionnel de papier de manière que l'aiguille aimantée reste horizontale dans le méridien magnétique.

Soit p le poids additionnel, a sa distance à l'axe, r la distance des pôles de l'aiguille à l'axe de suspension, m la masse magnétique idéale qui représente le magnétisme du pôle de l'aiguille, Z la composante verticale terrestre.

Quand l'aiguille est horizontale et en équilibre, on sait que les moments par rapport à l'axe de rotation du couple terrestre et du poids p sont égaux; on a donc :

$$2m.\mathrm{Z}.r = p.a.$$

Dans un autre lieu terrestre, il faudra déplacer le poids p et le mettre à une distance b de l'axe, pour que l'aiguille conserve son horizontalité; on aura donc, en admettant que le magnétisme de l'aiguille n'ait pas changé,

$$2m.\mathrm{Z}'.r = p.b.$$

D'où :

$$\frac{\mathrm{Z}}{\mathrm{Z}'} = \frac{a}{b}.$$

Nous verrons dans la quatrième partie comment ce petit appareil permet, sans faire incliner le navire, de compenser rapidement la déviation anormale de l'aiguille aimantée, qui est causée par la bande du navire.

Forces magnétiques absolues. — Les observations et les formules précédentes donnent le moyen d'obtenir le rapport de deux forces magnétiques, quelles que soient d'ailleurs les unités adoptées pour obtenir la valeur absolue de ces forces. Pour rendre toutes les observations comparables entre elles, on a choisi un système particulier d'unités de temps, de longueur et de masse, et on a appelé les valeurs numériques des forces obtenues avec ces unités, forces absolues. Pour passer de ces valeurs absolues aux valeurs des mêmes forces, mesurées avec un système quelconque d'autres unités, il suffit de connaître les rapports qu'ont entre elles les unités de même espèce.

Ainsi, dans la carte d'égales forces horizontales du Manuel de l'amirauté anglaise, on a pris pour unité arbitraire la valeur de la force horizontale à Greenwich; si on veut obtenir les valeurs absolues de ces forces quand on prend pour unité de temps la seconde, pour unité de longueur le pied anglais, pour unité de masse le grain anglais qui pèse 0 gr. 064, système d'unité qui est jusqu'à présent adopté par le gouvernement anglais, on trouve qu'il faut multiplier tous les nombres de la carte par 3,86, qui représente la force horizontale à Greenwich dans ce système.

Les trois unités absolues généralement adoptées aujourd'hui, d'après les prescriptions du Congrès des Électriciens tenu à Paris à la fin de 1881, sont le centimètre, la seconde et le gramme-masse.

Ce système d'unités s'appelle souvent le système centimètre-gramme-seconde, ou centimétrique. On le désigne ordinairement par l'abréviation c. g. s. Avec ce système d'unités, la force horizontale à Greenwich a pour expression 0,17, c'est-à-dire que tous les nombres de notre carte doivent être multipliés par 0,17 pour être ramenés à ce nouveau système d'unités. Nous avons conservé la numération des cartes de la première édition, malgré notre adhésion complète aux résolutions du Congrès, parce qu'elle nous semble plus commode et plus propre à éviter les erreurs dans des calculs d'ailleurs essentiellement pratiques et par suite grossièrement approchés.

Cartes d'égales forces horizontales. — On trouvera à la fin de ce volume une carte donnant les courbes d'égale force horizontale, et en marge, à côté de chaque courbe, la valeur du rapport $\frac{1}{H}$ qui correspond à cette courbe et dont nous aurons besoin plus tard. On peut constater sur cette carte que la force horizontale, maxima près de l'équateur, diminue à mesure que l'on approche des pôles magnétiques : mais il ne faut pas oublier que cela ne provient nullement d'une diminution de la force magnétique totale, mais seulement de ce que la direction de cette force totale se rapprochant de plus en plus de la verticale à mesure que l'observateur se rapproche des pôles, sa composante horizontale diminue de plus en plus tandis que sa composante verticale augmente. (V. planche III).

Ce qui est hors de doute, c'est la fluctuation continuelle du magnétisme terrestre, qui, en dehors des lents et graduels changements qu'il éprouve de siècle en siècle, éprouve encore des variations annuelles et diurnes. On soupçonne aussi des fluctuations plus petites dues à l'influence de la lune.

Mais, outre toutes ces petites variations périodiques qui changent la direction des aiguilles d'inclinaison et de déclinaison d'une fraction de degré seulement, ce qui correspond à une variation de $\frac{1}{100}$ environ de la force directrice, le magnétisme terrestre subit encore parfois des perturbations irrégulières assez considérables pour changer la direction des aiguilles aimantées de 1 et 2 degrés et la force magnétique de 2 ou 3 pour 100 de sa valeur. Ces perturbations sont causées par des sortes de tempêtes magnétiques qui semblent liées avec l'apparition des aurores boréales. Les télégraphes aériens et sous-marins révèlent aussi des perturbations dues à l'électricité atmosphérique et à l'électricité souterraine, et on sait les relations étroites de l'électricité et du magnétisme. Enfin on soupçonne une relation entre l'abondance des taches solaires et les tempêtes magnétiques.

Ces dernières ont été très nombreuses lors du dernier maximum des taches en 1870. Un travail très considérable, publié en 1886 par Sir G. Airy et dans lequel il a condensé et discuté toutes les observations faites sur ce sujet, ne laisse aucun doute sur la liaison entre les deux phénomènes.

Ce que nous venons de dire suffit pour faire connaître ce qu'il est indispensable de savoir. Nous renvoyons le lecteur désireux de détails complémentaires aux appendices et notes.

PREMIÈRE PARTIE

DÉVIATION DES COMPAS

INTRODUCTION

Les notions élémentaires de mécanique et de physique rappelées dans l'introduction vont être appliquées à l'analyse de la déviation du compas. Nous montrerons les lois différentes des actions exercées sur le compas par les différentes pièces de fer du navire, suivant qu'elles sont aimantées d'une façon permanente ou sous l'action de la force terrestre seulement.

En décomposant chacune des forces exercées par ces pièces sur l'extrémité Nord du compas en deux composantes dirigées l'une vers le Nord, l'autre vers l'Est magnétiques, nous donnerons une expression très simple de la tangente trigonométrique de la déviation, sous la forme d'un quotient de deux expressions renfermant le cap magnétique du navire et cinq coefficients particuliers qu'on appelle les coefficients *exacts* de la déviation. L'emploi de cette formule exacte conduirait à des calculs trop longs pour être d'un usage commode dans la pratique courante. On remarque que dans le cas général de la pratique, celui où la déviation ne dépasse 20 degrés à aucun cap, quand le bâtiment est droit sur sa quille, on peut sans erreur trop sensible, la remplacer par une autre qui donne la valeur même de la déviation en degrés, au moyen d'une somme de cinq termes ne renfermant que le cap du navire au compas et cinq coefficients, liés étroitement aux premiers, et qu'on appelle cette fois coefficients *approchés* pour bien indiquer qu'ils proviennent d'une hypothèse particulière.

Comme parmi ces coefficients, trois sont constants, il en résulte que le problème général : Connaître, dans un lieu donné, la variation à un cap quelconque du compas, se réduit à la détermination des deux coefficients variables, détermination qu'on peut effectuer au moyen de deux observations seulement de déviation, opération bien autrement rapide et simple que celle qui consiste à faire un tour d'horizon.

Examinant ensuite l'action que la bande du navire exerce sur la déviation, nous verrons qu'en général elle se réduit à introduire un nouveau coefficient de plus.

De telle sorte que quand un bâtiment a déjà navigué, autrement dit quand on a la valeur des trois coefficients constants, il suffit de trois observations seulement pour pouvoir dresser les deux tables complètes donnant la variation à tous les caps du compas que le navire soit droit ou incliné.

Nous terminerons en indiquant quels sont les principes qui doivent guider dans la construction et le choix d'un compas, pour éviter que ces indications ne soient troublées d'une façon dangereuse par les forces magnétiques ou dynamiques dont il subit l'influence à bord.

Cette première partie est la plus importante de tout l'ouvrage, elle en est pour ainsi dire la clef. Bien comprise, elle permet de passer immédiatement à la quatrième partie, où a été exposée la compensation des compas, sans qu'il y ait nécessité absolue d'y arriver après la lecture des deux parties intermédiaires, dont l'une, la seconde, ne contient que les procédés et types de calculs les plus commodes, pour obtenir les cinq coefficients approchés, et dont l'autre, la troisième, donnant les relations entre les coefficients exacts et les forces magnétiques, ne peut être abordée avec fruit que si la première a été parfaitement saisie, et n'est d'ailleurs pas indispensable au contrôle des compas par les méthodes employées habituellement jusqu'ici à bord des navires.

Un navire contient de nombreuses pièces de fer; les unes arrivent à bord déjà aimantées; les autres s'aimantent d'une manière permanente, sous l'action de la terre, tandis qu'elles sont soumises à toutes les opérations mécaniques de la construction; d'autres enfin restent à l'état de fer doux, c'est-à-dire qu'à un moment donné elles prennent un état magnétique déterminé par le lieu du globe où se trouve le bâtiment et par la position que ce dernier occupe par rapport au méridien magnétique, position indiquée par le cap.

Couple déviateur. — Si on suppose toutes ces pièces de fer situées à des distances du compas telles qu'on puisse négliger la longueur de l'aiguille vis-à-vis de ces distances, il est clair que les actions magnétiques partielles exercées par chacune d'elles sur les deux pôles de l'aiguille, seront égales, parallèles et de sens opposé, formeront des couples par conséquent, et se composeront pour donner un couple résultant que nous pourrons décomposer comme le couple terrestre, pour la commodité du raisonnement, en un couple vertical et un couple horizontal. Nous ne nous occuperons pas du premier, qui n'intervient en aucune façon sur la position du plan vertical passant par l'axe de l'aiguille, et nous appellerons le second couple déviateur pour bien indiquer que c'est lui qui écarte l'aiguille aimantée de la position qu'elle occuperait si elle était soumise à l'action du seul couple terrestre horizontal, que l'on appelle couple directeur terrestre.

Force directrice de l'aiguille aimantée. — Déviation. — Puisque les deux pôles de l'aiguille aimantée sont soumis à des forces dont le sens seul diffère, ne considérons, pour fixer les idées et simplifier l'exposition, que l'un d'eux, celui qui se dirige vers le Nord, le pôle rouge d'après nos conventions, et examinons les forces horizontales auxquelles il est soumis.

A terre, ce pôle est soumis à la seule influence de la composante horizontale magnétique, et, comme l'aiguille est mobile dans le plan horizontal, elle tournera jusqu'à ce qu'elle coïncide avec la direction de la force, c'est-à-dire avec le méridien magnétique, ou la ligne Nord-Sud magnétique.

A bord, ce même pôle est soumis non seulement à la force précédente, mais encore à l'une des forces du couple déviateur; l'aiguille prendra donc la direction de la résultante de ces deux forces, qu'on appelle la force directrice de l'aiguille.

L'angle que l'aiguille dans cette nouvelle position fait avec la direction du méridien magnétique s'appelle la *déviation* de l'aiguille correspondant au cap actuel du bâtiment; nous la désignerons désormais par la lettre grecque δ. Or la direction et la grandeur de la force directrice de l'aiguille (voir la *Comp. des forces*, page 3) dépendent de celles des deux composantes, et il est évident qu'une même force déviatrice aura sur la direction de l'aiguille, sur la déviation, une influence d'autant plus considérable que la force terrestre aura une intensité moindre. Il y a donc, on le voit, comme une sorte d'antagonisme entre ces deux forces, et la déviation sera d'autant plus faible que la force déviatrice sera d'intensité plus faible, de direction plus voisine de celle de la force terrestre, et que la force terrestre sera elle-même plus considérable.

Mais il nous faut analyser de plus près les influences magnétiques qui produisent cette déviation, car ce qu'on appelle l'état magnétique d'un bâtiment est un état fort complexe dont il est nécessaire de se rendre parfaitement compte avant d'aller plus loin.

Nous avons divisé plus haut les pièces de fer que contient le navire en deux espèces parfaitement distinctes: les unes, composées de fer dur, possédant ce que nous avons appelé la force coercitive et agissant sur l'aiguille à la manière d'aimants permanents; les autres, composées de fer doux, subissant instantanément l'action magnétique de la terre qui correspond à la position qu'elles occupent.

Malheureusement la netteté même de cette division montre que les choses ne doivent pas se passer ainsi dans la réalité, et que les deux états du fer que nous venons d'indiquer ne sont pour ainsi dire que des états limites, autrement dit, des conceptions de l'esprit utiles pour simplifier et permettre l'étude des phénomènes. En réalité, les pièces de fer de bâtiment se composent de fer imparfaitement dur et de fer imparfaitement doux. L'état magnétique des premières, au lieu d'être constant, variera plus ou moins après le lancement du navire, d'après les conditions particulières dans lesquelles le navire s'est trouvé pendant sa construction et son armement. Quant au fer imparfaitement doux, les actions mécaniques subies pendant la construction développent en lui un certain état magnétique, plus stable que celui qu'il prendrait sous la seule action terrestre, et dont il ne perdra la trace qu'au bout d'un certain temps plus ou moins long, après lequel il subira, non pas instantanément, mais très rapidement, l'influence magnétique de la terre correspondant à la position qu'il occupe.

D'une façon générale le fer dur ou doux dans le sens mécanique ou métallurgique l'est également dans le sens magnétique. Le fer dur se courbe difficilement, il se rompt et se déchire si cette courbure dépasse une certaine limite. Le fer doux se courbe aisément, prend facilement une déformation permanente et se casse très difficilement.

Toutes les opérations mécaniques donnent au fer la double propriété, d'une part de contracter plus rapidement un état magnétique déterminé sous l'influence de forces ou d'un champ magnétique donné, et d'autre part de perdre plus aisément cet état magnétique quand il a été préalablement éloigné du champ magnétique qui le lui avait donné. Toutes les opérations mécaniques et un brusque refroidissement tendent à rendre le fer dur. L'échauffement à haute température, la fusion, le refroidissement graduel tendent à rendre le fer doux.

Les différences magnétiques aussi bien que les différences mécaniques sont plus marquées entre l'acier doux et l'acier dur qu'entre les deux mêmes sortes de fer.

Magnétisme permanent et sous-permanent. — A proprement parler le magnétisme d'un navire ne saurait être considéré comme rigoureusement permanent, il est dans un état de fluctuation incessante. La pratique apprend cependant qu'après deux ou trois ans de navigation, les variations de l'état magnétique sont très faibles pour de longs intervalles de temps, un an et plus.

On appelle magnétisme permanent celui qui constitue cet état limite vers lequel semble tendre plus ou moins rapidement l'état magnétique du bâtiment. Nous appellerons magnétisme sous-permanent celui qui, contracté par les pièces de fer imparfaitement dur ou doux, disparaît plus ou moins vite après le lancement et les premières traversées, pour reparaître dans une mesure plus faible sous l'influence d'une même route longtemps suivie, particulièrement quand le bâtiment est en fer et marche à la vapeur, ou d'un même cap longtemps gardé au bassin et dans le port, surtout quand la coque est soumise à des réparations plus ou moins importantes.

A ces deux sortes de magnétisme, vient s'ajouter à chaque instant le magnétisme essentiellement passager, contracté par le fer doux sous l'influence de l'action magnétique terrestre; et ce magnétisme dépend essentiellement du point du globe où se trouve le navire, et aussi du cap du bâtiment à ce moment et en ce point.

Magnétisme induit. — On donne le nom de magnétisme induit à ce magnétisme contracté par le fer doux sous l'influence terrestre.

Examinons maintenant l'action des diverses influences magnétiques qui produisent la déviation.

CHAPITRE PREMIER

ACTION DES AIMANTS SUR L'AIGUILLE DU COMPAS

DÉVIATION SEMI-CIRCULAIRE

Action sur l'aiguille aimantée d'un aimant placé au-dessus ou au-dessous de la rose. — *Exemple I* (*fig.* 13) : Soit *n s* une aiguille aimantée, suspendue en son milieu et maintenue horizontale, c'est-à-dire soustraite, au moyen d'un contre-poids, à l'influence de l'inclinaison.

Plaçons un barreau aimanté N S dans un plan horizontal voisin du sien et de telle manière que, les centres du barreau et de l'aiguille étant sur la même verticale, les pôles les plus voisins de ces deux aimants soient de même nom. A cause de leur proximité, l'action du barreau sur l'aiguille l'emportera sur l'action de la terre, et l'aiguille va se renverser cap pour cap, pour obéir à la loi des pôles.

D'un autre côté, si nous éloignons le barreau successivement en le maintenant parallèle à lui-même, nous verrons l'aiguille revenir successivement aussi à sa première position, et, à partir d'une certaine position du barreau, elle reprendra sa direction initiale. Il est évident qu'à ce moment et dans cette position le barreau n'a plus aucune influence sur l'aiguille.

De cette seconde position limite où le barreau a une influence nulle, amenons-le à une autre un peu plus rapprochée de l'aiguille, et voyons ce qui se passe quand on le fait tourner dans un plan horizontal, de 360 degrés autour de son centre, dans le sens de la flèche, et en le supposant placé d'abord dans le *même plan vertical* que l'aiguille.

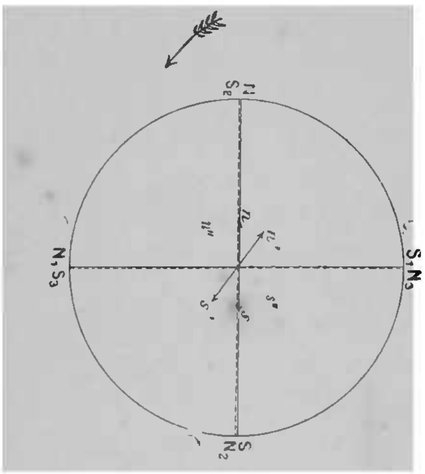


Fig. 13.

Le barreau occupera successivement ainsi les positions marquées par les lignes pleines N S, $N_1 S_1$, puis les positions marquées par les lignes ponctuées $N_2 S_2$ et $N_3 S_3$.

Soit *n s* (*fig.* 13) la position d'équilibre de l'aiguille aimantée sous l'influence terrestre; N S la première position du barreau; dans cette position, ce dernier a une influence nulle sur la position de l'aiguille dans le plan horizontal, car toutes les attractions et répulsions magnétiques s'exercent dans le plan vertical qui contient l'aiguille, autrement dit le méridien magnétique.

L'aiguille est d'ailleurs dans une position d'équilibre instable, car, si on vient alors à écarter très légèrement l'aiguille du méridien, alors la répulsion de N sur le pôle de même nom de l'aiguille, celle de S sur *s* et de même les attractions respectives de N et S pour *s* et *n*, donneront lieu à un couple déviateur horizontal; à cause des distances respectives des pôles de l'aiguille aux pôles de l'aimant, les répulsions seront plus fortes que les attractions, et l'aiguille prendra une des deux positions $n's'$ ou $n''s''$ puisque l'équilibre est instable. Prenons $n's'$. Le raisonnement serait identique pour $n''s''$ L'angle $n\,o\,n'$ est la déviation Est ou positive produite par le barreau NS.

Comme l'action des pôles de l'aimant sur ceux de l'aiguille est contraire à celle que les pôles terrestres exercent, il en résulte que la force directrice de l'aiguille, celle qui doit la ramener à sa position d'équilibre quand elle en est écartée, est diminuée. Il est aisé de voir toujours, au moyen de la loi des pôles et de celle de la composition des forces, de celle enfin des actions magnétiques, que, quand l'aimant va de la position N S à la position $N_2 S_2$, en passant par la position $N_1 S_1$, il produit dans toutes les positions intermédiaires une déviation Est ou positive, qui varie de 0 à 0 et par suite passe par un maximum entre ces deux valeurs nulles.

De même, si nous examinons ce qui se passe quand l'aimant va de la position $N_2 S_2$ à la position N S, en passant par la position $N_3 S_3$, nous verrons, au moyen des trois lois déjà citées, que l'aimant produit toujours sur l'aiguille une déviation Ouest ou négative, qui varie de 0 à 0, en passant encore par un maximum.

Déviation semi-circulaire. — En somme, dans sa rotation complète, le barreau aimanté a produit sur l'aiguille des déviations qui conservent le même signe dans tout un demi-cercle de la rose, changent de signe quand l'aimant passe d'un demi-cercle dans l'autre, et varient de 0 à 0 en passant par un maximum en valeur absolue dans chaque demi-cercle. On donne à toute déviation qui suit cette loi, le nom de déviation semi-circulaire.

On trouve d'ailleurs facilement la direction de l'aiguille aimantée, c'est-à-dire la déviation qui correspond à une position déterminée quelconque de l'aimant perturbateur, quand on suppose la longueur de l'aiguille négligeable et la distance de l'aimant à l'aiguille comme variant assez peu pour qu'on puisse considérer son action sur celle-ci comme constante en grandeur et parallèle à la direction du barreau.

En effet, soit $OP = P$ la grandeur constante de la force (variable seulement en direction), que cet aimant exerce sur le pôle n de l'aiguille. Si l'on imagine que cet aimant ait tourné d'un angle ζ, la force O P fera le même angle avec le méridien magnétique, et l'aiguille, soumise, en n, aux deux forces $OT = H$, composante horizontale de la force magnétique terrestre, et $OP = P$, prendra, d'après la loi de la composition des forces, la direction O R. La déviation δ sera donnée dans le triangle rectangle O R V (*fig.* 14) par la formule :

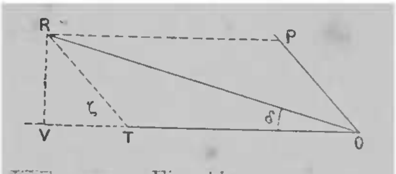


Fig. 14.

$$(1) \qquad \operatorname{tg} \delta = \frac{RV}{OV} = \frac{RV}{OT + TV} = \frac{P \sin \zeta}{H + P \cos \zeta}.$$

Cette formule nous donne aisément un résultat dont nous nous servirons par la suite. Cherchons la condition pour que tg δ ou δ

elle-même soit maxima. La valeur de ζ qui correspondra à ce maximum doit annuler la dérivée de tg δ par rapport à ζ.

Si on pose $\frac{P}{H} = a$, cette condition donne $\cos \zeta = -a$.

D'où :
$$\operatorname{tg} \zeta = -\frac{\sqrt{1-a^2}}{a}.$$

D'ailleurs pour cette valeur particulière de ζ, on a,
$$\operatorname{tg} \delta = \frac{a}{\sqrt{1-a^2}};$$

par conséquent $\operatorname{tg} \zeta \operatorname{tg} \delta = -1$, ce qui veut dire que les angles δ et ζ sont complémentaires, c'est-à-dire que la droite O P est perpendiculaire sur la droite O R. D'où cette conséquence qu'un aimant perturbateur produit sur l'aiguille aimantée une déviation maxima quand sa direction est perpendiculaire à celle de l'aiguille déviée.

Si nous supposions que la position initiale de l'aimant perturbateur fût perpendiculaire au méridien magnétique, et que nous appelions Q la grandeur O Q de la force qu'il exerce sur le pôle n, nous verrions, en faisant une figure analogue à la figure précédente, que, si l'aimant a tourné d'un angle ζ, l'aiguille soumise aux deux forces O T et O Q prend la direction OR_1 et que la déviation δ est donnée dans le triangle rectangle OR_1V_1 par la formule :

$$(2) \qquad \operatorname{tg} \delta = \frac{R_1 V_1}{O V_1} = \frac{Q \cos \zeta}{H + Q \sin (\zeta + 90)} = \frac{Q \cos \zeta}{H - Q \sin \zeta}.$$

Examinons enfin le cas général, celui où le barreau, toujours horizontal et dans le plan de la rose, part d'une position initiale dans laquelle il fait un angle quelconque avec le méridien. Soit O F la grandeur et la direction de la force qu'il exerce dans cette position sur le pôle n de l'aiguille.

Décomposons cette force OF en deux autres, l'une $OP = P$ dirigée dans le sens du méridien, l'autre $OQ = Q$ dirigée dans le sens perpendiculaire. On peut toujours imaginer que ces deux forces P et Q émanent de deux barreaux aimantés, placés, le premier dans le méridien, le second perpendiculairement à lui.

Si l'aimant donné tourne d'un angle ζ, les deux aimants composants tournent également d'un angle ζ, de même que les forces O P et O Q. D'après la loi de la composition des forces, on aura la direction de l'aiguille aimantée, en menant : 1° O T égale et parallèle à la force terrestre; 2° TP_1 parallèle à la nouvelle position de O P, c'est-à-dire faisant un angle ζ avec le méridien, et égale à cette ligne ; 3° et enfin $P_1 Q_1$ égale à O Q et parallèle à la nouvelle position de cette ligne, c'est-à-dire faisant un angle ζ avec la perpendiculaire au méridien.

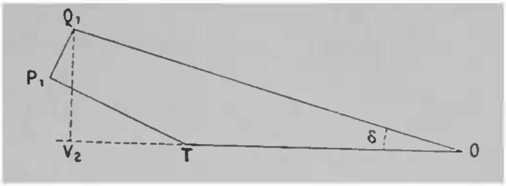


Fig. 15.

La déviation δ est donnée en considérant le triangle rectangle $O Q_1 V_2$ (*fig.* 15), par la formule :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P \sin \zeta + Q \cos \zeta}{H + P \cos \zeta - Q \sin \zeta}. \tag{3}$$

Force directrice moyenne vers le Nord. — Influence des aimants sur cette force. — En somme, dans les deux cas précédents, nous sommes parvenus à l'expression de la tangente de la déviation, par une méthode aussi élémentaire que générale et que nous suivrons toujours par la suite. Elle consiste à décomposer toutes les forces qui agissent sur le pôle rouge de l'aiguille en deux composantes, l'une dirigée vers l'Est magnétique, l'autre dirigée vers le Nord magnétique, et à diviser la somme des premières par la somme des secondes.

La composante la plus importante, celle dont nous devons nous occuper particulièrement, puisque c'est elle qui tend à ramener l'aiguille du compas à bord dans le méridien magnétique, c'est-à-dire dans la position d'équilibre normal qu'elle aurait à terre, c'est évidemment la composante vers le Nord, que nous appellerons dorénavant d'un nom particulier, *Force directrice vers le Nord*, et nous sous-entendrons toujours, pour le cap correspondant du navire.

Concevons que l'on additionne les valeurs de cette force directrice qui correspondent à des caps de la rose équidistants et en nombre quelconque, et divisons cette somme par le nombre même des caps ; on forme ainsi la *Force directrice moyenne vers le Nord,* que nous appellerons, d'une manière abrégée, *Force moyenne vers le Nord,* et qui joue un rôle important dans les mouvements du compas.

Si nous examinons l'influence d'un aimant perturbateur sur cette force moyenne, quand le cap du navire décrit la rose entière, nous verrons qu'elle est nulle, puisque le terme qui la représente dans la composante vers le Nord change de signe quand on passe du cap considéré au cap diamétralement opposé.

Action sur l'aiguille aimantée d'un aimant placé sur le même plan horizontal que la rose. — *Exemple II* (*fig.* 16) : Soit encore *ns* l'aiguille aimantée dans sa position d'équilibre naturel, c'est-à-dire dans le méridien magnétique; voyons ce qui se passe quand un barreau aimanté tourne de 360 degrés autour du centre O dans le sens de la flèche, en partant de la position NS, pour occuper sucessivement les positions NS, N_1S_1, N_2S_2, N_3S_3, enfin NS.

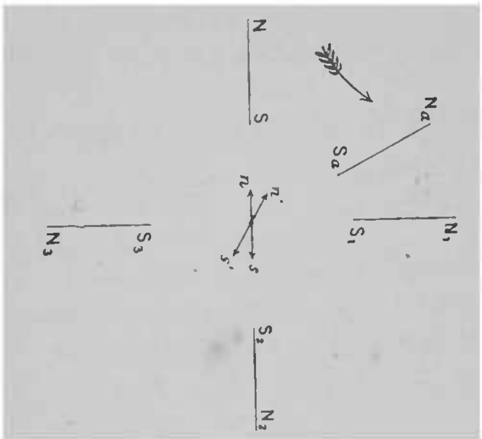


Fig. 16.

Pour nous rendre compte des phénomènes, il suffit encore de faire appel aux trois lois fondamentales de la composition des forces, des pôles et des actions magnétiques. Cette dernière, en particulier, nous montre que nous pourrons, sans erreur sensible, négliger de considérer l'action du pôle N sur l'aiguille, car, puisque les actions magnétiques varient en raison inverse du carré des distances, l'action du pôle S sera de beaucoup prépondérante.

De même que tout à l'heure, nous verrons que, quand le barreau va de la position NS à la position N_2S_2, il produit sur l'aiguille une déviation toujours Est ou positive, qui varie de 0 à 0, en passant par un maximum qui correspond à la position du barreau perpendiculaire à celle de l'aiguille déviée.

Prenons, en effet, le barreau dans la position intermédiaire N_aS_a. Le pôle S_a, le seul dont nous considérions l'action, attire le pôle *n*, repousse le pôle *s*, et (si nous supposons que le barreau soit suffisamment éloigné de l'aiguille pour qu'on puisse négliger la longueur de celle-ci vis-à-vis de cette distance) produit par conséquent un couple déviateur horizontal, qui fait prendre à l'aiguille la position *n's'*. L'angle *non'* représente une déviation orientale ou positive, puisque le Nord de l'aiguille a été rejeté à droite du Nord magnétique, c'est-à-dire entre le Nord et l'Est magnétiques.

Nous ne répéterons plus désormais ce raisonnement, qui est identiquement le même dans tous les cas que nous allons successivement examiner, et nous n'énoncerons plus que les résultats.

De même, quand le barreau de la *fig.* 16 va de la position N_2S_2

à la position NS en passant par la position $N_3 S_3$, il est aisé de voir qu'il produit sur l'aiguille aimantée une déviation toujours occidentale ou négative, qui varie de 0 à 0 en passant par un maximum, qui a lieu quand le barreau perturbateur et l'aiguille déviée sont perpendiculaires l'un à l'autre.

Quant à la formule qui donne la déviation, elle dépend, comme dans l'exemple précédent, de la position initiale du barreau aimanté, et est identique, dans chaque cas, à la formule du cas correspondant traité plus haut.

Action d'un aimant placé perpendiculairement au plan de la rose. — *Exemple III :* Les mêmes raisonnements montrent qu'un aimant vertical produit sur le compas une déviation semi-circulaire dont la tangente est donnée, suivant la position initiale de l'aimant, par l'une des trois formules données dans l'exemple I.

Cas général. — C'est évidemment celui d'un aimant perturbateur incliné sur l'horizon d'un angle quelconque. Si les hypothèses fondamentales sont remplies, cet aimant produit sur l'aiguille aimantée un couple déviateur.

Considérons seulement celle des forces de ce couple qui est appliquée au pôle n de l'aiguille. Nous pouvons décomposer cette force en trois composantes dirigées, l'une P suivant la méridienne magnétique, l'autre Q suivant une horizontale perpendiculaire à cette direction, la dernière R, enfin, suivant la verticale, et imaginer que chacune de ces forces provient d'un barreau aimanté placé suivant la direction correspondante.

Sur une rose de compas horizontale, les deux premiers aimants P et Q causeront seuls la déviation. Le troisième R, étant perpendiculaire au plan de la rose et passant par le centre du pivot, n'interviendra dans la déviation que si le bâtiment s'incline, ce qui fera prendre à cet aimant une position oblique par rapport à la rose, position dans laquelle il donnera, sur le pôle rouge, une composante horizontale.

Applications au navire. — Appliquons maintenant au navire et à la rose du compas à bord tout ce que nous venons de dire. Supposons que le cap initial du navire soit le Nord magnétique, et négligeons pour un instant tout ce qui provient du fer doux. Quelque variée que soit la forme des aimants qui existent à bord, quel que soit leur nombre, si les hypothèses fondamentales sont remplies, toutes les actions qu'ils exercent sur l'aiguille se composent en un couple unique. Ne considérons que celle des composantes du couple qui agit sur le pôle *n* de l'aiguille. On peut, comme dans le paragraphe précédent, décomposer cette force unique en trois autres, dirigées l'une P vers l'avant du navire, l'autre Q vers tribord ou bâbord suivant les cas, la dernière enfin R, dirigée suivant la verticale vers le haut ou vers le bas, suivant les cas, et supposer que ces forces émanent d'aimants, placés dans les mêmes directions.

Quand le bâtiment est droit sur sa quille, les deux premiers aimants P et Q agissent seuls sur la déviation; mais, quand le navire s'incline d'un angle *i*, les trois aimants agissent simultanément.

Nous reviendrons tout à l'heure sur ce cas plus compliqué.

CHAPITRE II

ACTION DES PIÈCES DE FER DOUX SUR LE COMPAS

Déviation quadrantale. — Déviation semi-circulaire.

Action de la terre sur le fer doux. — L'action, sur le compas, du fer doux du navire magnétisé par l'influence terrestre, est un peu plus compliquée que la précédente. En effet, dans le cas d'aimants permanents nous avions affaire à des forces constantes en grandeur et dont la direction seule changeait pendant la rotation du bâtiment, tandis qu'avec le fer doux et pendant cette rotation, les forces magnétiques mises en jeu changent à la fois en direction et en intensité, puisque cette dernière dépend de la position du fer doux à la surface du globe, et que cette position varie avec le cap du bâtiment. Avant d'entrer dans plus de détails, rappelons ce que l'expérience nous apprend au sujet de l'action magnétique exercée par la terre sur le fer doux. Afin qu'il ne puisse pas s'établir de confusion avec ce que nous avons dit des aimants, nous emploierons toujours, quand il s'agira de fer doux, le mot tige pour désigner une pièce allongée de fer doux que nous supposerons infiniment mince, réservant le mot de barreau pour désigner un aimant permanent.

Si on place une tige de fer doux dans la direction de l'aiguille d'inclinaison, qui est celle des forces du couple magnétique terrestre, on constate qu'elle devient magnétique, et, comme on pouvait s'y attendre d'après la loi des pôles, l'aimantation est distribuée de telle sorte que, dans l'hémisphère Nord de la Terre, la partie inférieure de la tige, qui est dirigée vers le Nord, est un pôle austral ou rouge, tandis que la partie supérieure, qui est dirigée vers le Sud, est, par contre, un pôle boréal ou bleu.

Dans l'hémisphère Sud de la terre, les pôles de la tige changeraient bout pour bout.

Si, partant de cette position C D, on fait tourner la tige de façon qu'elle occupe successivement les positions $C_1 D_1 C_2 D_2$... (*fig.* 16 *bis*), on trouve que l'intensité de magnétisme développé dans la tige diminue, et que cette intensité est proportionnelle $F \times \cos \alpha$, en appelant F l'intensité magnétique terrestre et α l'angle de la tige avec l'aiguille d'inclinaison.

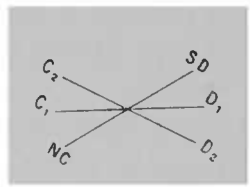


Fig. 16 *bis*.

Quand α est égal à 90 degrés, c'est-à-dire quand la tige se trouve dans le plan perpendiculaire à la direction de l'inclinaison, et suivant une droite quelconque de ce plan, elle ne donne plus aucune trace d'aimantation.

Si, la tige occupant une des positions CD, on vient à la retourner bout pour bout, on constate que les pôles changent également bout pour bout, de façon que le pôle rouge soit toujours à sa partie inférieure.

Pour étudier plus facilement les phénomènes magnétiques à bord d'un navire, nous ne considérerons que celle des composantes F du couple magnétique terrestre qui agit sur le pôle rouge de l'aiguille, et nous la décomposerons en deux autres forces, l'une H située dans le plan horizontal et que nous appellerons dorénavant composante horizontale terrestre, l'autre Z dirigée suivant la verticale, et vers le nadir, puisque c'est l'extrémité inférieure de l'aiguille d'inclinaison qui pointe vers le Nord.

Axes choisis pour la décomposition des forces magnétiques à bord. — La direction des forces exercées par les aimants permanents qui appartiennent au navire, la direction et l'intensité des forces exercées par les pièces de fer doux contenues dans ce même bâtiment, dépendent du cap du bâtiment. On comprend donc qu'il soit utile de rapporter la direction des barreaux et celle des tiges à des directions fixes dans le navire, de façon qu'il suffise de connaître le cap pour savoir, par cela même, la direction et la grandeur des diverses forces perturbatrices.

Trois directions fixes dans le navire suffisent pour déterminer la position de tout point ou droite lié invariablement avec lui. Les trois directions que nous choisirons auront pour origine commune le centre de la rose et seront dirigées :

La première, O X, parallèlement à la quille et vers l'avant du bâtiment ;

La seconde, OY, dans le plan horizontal de la rose, et vers tribord ;

La troisième, OZ, suivant la verticale et vers le nadir.

Nous décomposerons toutes les forces magnétiques suivant ces trois directions, et nous affecterons chacune des composantes du signe + ou du signe — suivant qu'elle sera dirigée dans le sens même de l'un des axes ou en sens opposé.

Convention pour le cap. — Quant au cap du bâtiment, nous le compterons dans cet ouvrage de 0 à 360 degrés en partant du Nord pour y revenir en passant successivement par l'Est, le Sud, et l'Ouest, c'est-à-dire dans le sens du mouvement des aiguilles d'une montre.

M. Faye, dans son *Cours d'astronomie nautique*, a montré tous les avantages qu'il y aurait à compter le cap de cette facon. On supprimerait ainsi toutes les discussions de signes fort délicates qui compliquent la plupart des solutions pratiques des problèmes d'astronomie. Il suffirait, pour faire passer cette utile réforme dans la pratique, d'un simple changement dans la graduation des divisions de la rose, qu'il faudrait numéroter de 0 à 360 degrés, au lieu de les marquer de 0 à 90 degrés dans chaque quadrant en partant du Nord ou du Sud comme origine.

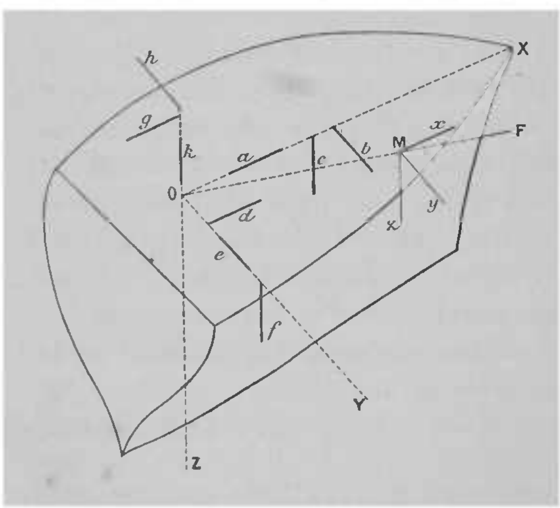


Fig. 17.

Représentation du fer doux du navire au moyen de neuf tiges idéales de fer doux (*fig.* 17)[1]. — Soit une pièce de fer doux située dans une position quelconque, M son pôle le plus voisin de la

1. Dans les trois figures bis 1, 5, 9, c'est-à-dire, dans le cas où le milieu de la tige de fer doux se trouve sur l'axe vertical du compas, on doit considérer

rose, OM la direction de la force qu'elle exerce sur le pôle n de l'aiguille. Soit MF la grandeur de cette force, on peut supposer que cette force est la résultante de trois forces exercées sur la rose par trois tiges de fer doux Mx, My, Mz, dirigées chacune suivant un de nos axes et dont les trois pôles seront confondus au point M[1].

Nous ne considérerons que l'action sur le pôle de l'aiguille, du pôle des tiges de fer doux qui est le plus voisin : et nous supposerons l'autre infiniment éloigné, de façon à pouvoir négliger son influence. Il en sera ainsi toutes les fois que nous nous occuperons de l'action des tiges de fer doux sur le compas, et cette hypothèse est légitime, parce que le magnétisme induit a en général une intensité très faible, et, comme son influence est inversement proportionnelle au carré de la distance, elle décroît très rapidement quand cette dernière augmente.

On peut négliger à plus forte raison l'action du second pôle quand il s'agit de l'influence réciproque d'un aimant et d'une tige de fer doux aimantée par lui, puisque l'intensité magnétique du fer doux est déjà inversement proportionnelle au carré de la distance qui le sépare de l'aimant. En effet, dans ce cas, l'attraction ou la répulsion qui varie, d'après la loi des actions magnétiques, proportionnellement au produit des intensités magnétiques, divisé par le carré de la distance, varie en somme en raison inverse de la quatrième puissance de la distance. Les forces magnétiques, dans ce cas, décroissent donc très rapidement avec la distance.

Considérons la tige de fer doux Mx, la force qu'elle exerce sur la rose est dirigée suivant OM; on peut décomposer cette force en trois autres dirigées, l'une suivant ox, l'autre suivant oy, l'autre suivant oz, et supposer que ces trois forces émanent de trois tiges de fer doux a,d,g, parallèles à la quille et placées, la première a, sur ox; la seconde d dans le plan horizontal de la rose, et de telle façon que son pôle le plus voisin soit sur oy; la troisième enfin g, au-dessus du plan de la rose et telle que son pôle le plus voisin soit sur la même verticale que le centre de la rose.

Il est d'ailleurs évident que, suivant la position de Mx par rap-

les deux extrémités comme agissant simultanément, tandis que, dans tous les autres cas, il suffit de considérer seulement l'action de l'extrémité la plus voisine du compas.

1. Nous allons remplacer chacune de ces trois tiges par trois autres, dirigées comme elles, mais telles que leurs pôles les plus rapprochés de la rose soient situés sur les axes de coordonnées.

port à la rose, les trois barreaux a, d, g pourront avoir l'une quelconque des places indiquées dans les figures doubles (1), (2), (3) de la planche I. Mais en somme, pour représenter l'effet de la tige de fer doux Mx, il n'y aura jamais que trois tiges en tout, une tige a, une tige d, une tige g.

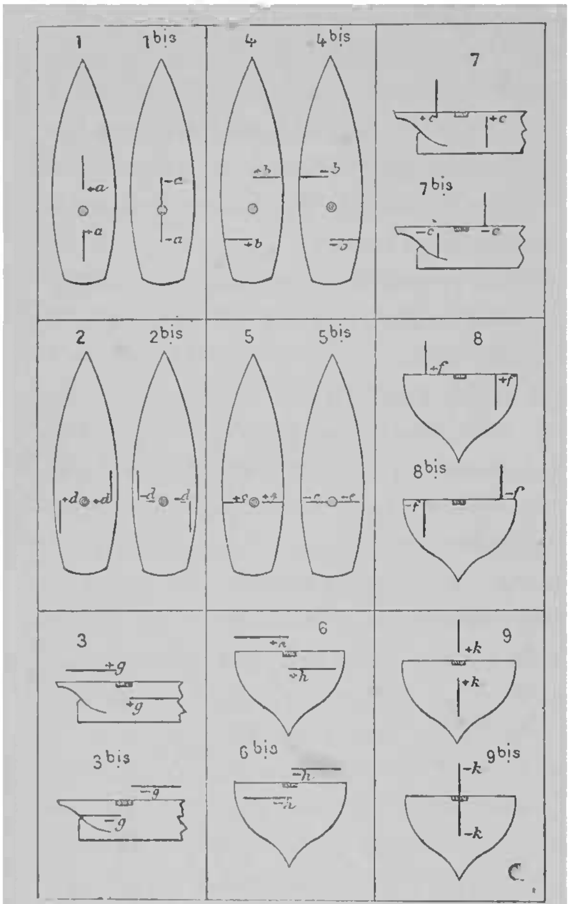


Planche I.

Si nous considérons maintenant la tige My, le même raisonnement montre qu'elle peut être remplacée par trois autres, toutes parallèles à oy, la première e sur oy, la seconde b dans le plan horizontal de la rose et telle que son pôle le plus voisin soit sur ox; la troisième enfin h telle que son pôle le plus voisin se trouve sur la verticale du centre de la rose.

Comme tout à l'heure suivant la position de My, ces trois barreaux pourront avoir l'une quelconque des places indiquées dans les figures doubles (4), (5), (6) de la planche I. Mais en somme il n'y en aura que trois, une de chaque espèce.

Les mêmes raisonnements répétés pour la tige Mz montreront qu'elle peut être remplacée, quant à son effet sur le compas, par les trois tiges verticales, c,f,k; c ayant un de ses pôles sur ox, f ayant un de ses pôles sur oy, k enfin située sur la même verticale que le centre de la rose.

Les positions diverses que peuvent occuper chacune de ces trois tiges sont indiquées sur les figures doubles (7), (8), (9) de la planche I.

Sur cette même planche on verra que chaque tige est affectée d'un signe qu'on détermine de la manière suivante : On met le signe + toutes les fois que la tige produit sur le pôle rouge une force dirigée suivant ox, oy ou oz: et le signe — toutes les fois qu'elle produit une force dirigée suivant l'une des trois directions contraires.

Les signes de la planche se rapportent à l'action que ces tiges exercent sur la pointe Nord de l'aiguille aimantée.

Chacune de ces tiges ne sera d'ailleurs soumise qu'à une des deux composantes de la force terrestre: ainsi toutes les tiges horizontales ne seront aimantées que par l'influence de la composante horizontale terrestre, les tiges verticales seront soumises à la seule influence de la composante verticale.

Insistons enfin sur notre hypothèse fondamentale, que la longueur de l'aiguille du compas peut être négligée, c'est-à-dire que dans nos raisonnements et dans nos figures il faudra considérer les deux pôles de l'aiguille comme confondus au centre o de celle-ci.

Déviation quadrantale. — Examinons maintenant l'action que chacune de ces neuf tiges exerce sur l'aiguille de la rose, et remarquons d'abord que, quand le navire est droit sur sa quille, les déviations sont indépendantes des actions exercées par les trois tiges g,h,k, car ces trois tiges n'exercent sur le compas que des forces verticales, et ce sont les forces horizontales qui, seules, puisque le navire est droit, agissent pour dévier le compas.

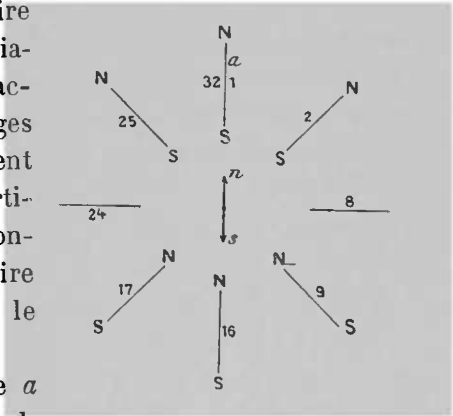


Fig. 18.

Prenons par exemple la tige a (*fig.* 18), et voyons ce qui arrive quand, par suite de la rotation du navire, elle occupe successivement autour de la rose les positions marquées 1, 8, 16, 32. Ne nous occupons que de l'action du pôle du fer doux le plus voisin de l'aiguille aimantée, admettons que ce fer doux ne soit aimanté que par l'influence terrestre et supposons que le cap initial du bâtiment soit le Nord magnétique.

Dans la position initiale du bâtiment, la tige a occupe la position 1, elle est aimantée par l'influence terrestre, et la loi des pôles montre qu'elle a son pôle rouge en N et son pôle bleu en S.

Dans cette position, elle ne cause aucune déviation, et, si on écarte l'aiguille du compas de sa position d'équilibre, elle tend à y revenir, non pas en vertu de l'action exercée par la seule composante horizontale terrestre, mais bien en vertu de cette force augmentée de celle de même sens que produit le pôle S du fer doux.

La force directrice de l'aiguille est donc augmentée par la tige *a*, et il est facile de voir que cela a lieu pour toutes les positions que prend successivement cette tige; car dans chacune de ces positions l'action de son pôle le plus voisin sur l'extrémité *n* de l'aiguille donne toujours une composante dirigée vers le Nord. Nous ne nous occuperons désormais que de la déviation produite par cette tige.

Supposons que le bâtiment tourne autour de la verticale du pivot de la rose, de façon que la tige de fer doux vienne occuper la position 2 dans laquelle ses pôles occupent respectivement les positions N et S. — Le pôle S attire le pôle *n* de l'aiguille et cause ainsi une déviation Est ou positive, puisque le nord de l'aiguille tombe entre le Nord et l'Est magnétique.

La tige aimantée produit une déviation de même signe pour toutes les positions comprises entre les positions 1 et 8.

Dans la position 8, elle ne cause aucune déviation, car elle n'est plus aimantée par l'action terrestre puisqu'elle est alors perpendiculaire au plan vertical qui contient l'aiguille d'inclinaison et par suite perpendiculaire à cette aiguille.

Dans toutes les positions comprises dans le demi-cercle inférieur, entre 8 et 24 en passant par 16, les pôles de cette tige sont placés de manière que le pôle N soit le plus voisin de la rose, tandis que dans le demi-cercle supérieur c'était le pôle S.

Dans toute position analogue à 9, c'est-à-dire comprise entre la position 8 et la position 16, le pôle N du fer doux attire vers lui et vers la droite du pôle *s* de l'aiguille, et rejette par conséquent le pôle *n* de cette aiguille entre le Nord et l'Ouest magnétiques (puisque l'aiguille tourne autour du centre O), causant ainsi une déviation qui reste occidentale ou négative dans tout ce quadrant.

Dans la position (16) la tige ne produit aucune déviation.

De la position (16) à la position (24), c'est-à-dire dans toute position analogue à la position (17), le pôle N de la tige attire encore le pôle *s* de l'aiguille, mais cette fois vers la gauche; le pôle *n* est donc rejeté entre le Nord et l'Est magnétiques, c'est-à-dire que, pour toutes les positions du barreau comprises dans ce quadrant, la déviation est orientale ou positive.

Dans la position (24) la tige ne cause aucune déviation, pour la même raison expliquée plus haut à propos de la position 8.

Enfin, il est évident, d'après ce que nous venons de dire, que, pour toutes les positions comprises entre 24 et 32, c'est-à-dire dans tout le quadrant de gauche du demi-cercle supérieur, la déviation produite par la tige est toujours occidentale ou négative.

Ainsi, en tournant autour du compas, la tige *a* produit sur le compas une déviation qui reste de même signe quand le cap du bâtiment reste vers le même quadrant et change de signe quand ce cap passe d'un quadrant dans un autre.

On donne le nom de « Quadrantale » à toute déviation qui suit cette loi.

En examinant l'action de toutes les autres tiges situées dans le plan horizontal, *b*, *d*, *e*, on verra par les mêmes raisonnements :

1° Qu'elles produisent toutes sur le compas une déviation quadrantale ;

2° Que les barreaux *a* et *e* augmentent la force directrice moyenne de l'aiguille quand ils sont situés tout entiers d'un même côté du compas, tandis qu'ils la diminuent quand ils s'étendent de part et d'autre du centre de la rose.

Effet du fer doux sur la force directrice moyenne. — En somme, le fer doux horizontal influe de deux façons sur la déviation, d'abord d'une façon directe en produisant une déviation quadrantale, ensuite d'une façon indirecte en augmentant ou diminuant la force directrice de l'aiguille ; ce qui a pour effet, en vertu de la composition des forces, de diminuer ou d'augmenter la déviation produite par une force perturbatrice donnée.

Les aimants permanents, nous l'avons vu, n'ont pas cette action indirecte, puisqu'ils n'ont pas d'influence sur la grandeur de la force directrice *moyenne*. Le fer doux vertical, comme nous le verrons plus loin, n'a pas non plus d'influence sur cette force *moyenne*.

La différence des lois que suivent les déviations causées, l'une par les aimants permanents, l'autre par le fer doux situé dans le plan horizontal de la rose, ainsi que la différence de leurs actions sur la force directrice moyenne, proviennent de ce que, quand le cap du bâtiment décrit la rose entière, un aimant permanent présente toujours le même pôle à l'aiguille aimantée, tandis qu'une tige de fer doux dont l'aimantation change, bout pour bout, pendant cette rotation, présente alternativement ses deux pôles.

Et ceci nous montre qu'un aimant permanent pourra lui-même produire sur une aiguille aimantée une déviation quadrantale, pourvu qu'on lui imprime un déplacement convenable, c'est-à-dire un déplacement tel qu'il présente alternativement ses deux pôles à l'aiguille. Ce qui arrive, par exemple, quand le centre de l'aimant décrit un cercle autour de la rose, tandis que l'aimant lui-même reste toujours parallèle à sa direction initiale.

Mais ce n'est pas ce qui se passe quand le bâtiment tourne autour de la verticale.

Déviation semi-circulaire produite par le fer doux vertical. — Ce qui précède montre pourquoi les tiges de fer doux vertical *c* et *f* qui, elles aussi, agissent sur la déviation (puisqu'à cause de la position des pôles *c* et *f*, elles exercent sur l'aiguille des forces horizontales), produisent une déviation semi-circulaire.

Ces tiges, en effet, ne sont aimantées que par la composante verticale terrestre, et cette dernière conservant la même direction dans tout un hémisphère terrestre, il en résulte que les deux pôles de la tige considérée restent toujours placés de la même façon tant que cette condition géographique est remplie.

Par suite, pendant la rotation du navire, cette tige présentera toujours à l'aiguille un même pôle, et nous avons vu que c'est la condition nécessaire et suffisante pour obtenir une déviation semi-circulaire.

Influence du cap et de la position géographique du navire. — Dans un même lieu, la composante verticale terrestre a une valeur déterminée qu'on peut considérer comme constante pour un laps de temps assez considérable; par suite la déviation semi-circulaire qu'une tige de fer doux vertical imprimera à l'aiguille dépendra seulement du cap de bâtiment et de la valeur à ce cap de la composante horizontale magnétique à bord qui, elle, s'oppose à la déviation.

Quand le navire change de place en restant dans un même hémisphère, cette déviation conserve le même signe, mais change de grandeur, puisque la composante horizontale et la composante verticale terrestres changent toutes deux de valeur.

Enfin, quand le bâtiment passe d'un hémisphère dans l'autre, cette déviation change de signe, puisque la composante verticale terrestre change de sens. Et cette déviation ainsi changée de signe (c'est-à-dire positive dans le demi-cercle de l'horizon où elle était négative dans l'autre hémisphère et *vice versa*) change de grandeur quand le bâtiment se déplace pour les raisons que nous avons dites plus haut.

Le fer doux vertical n'a d'ailleurs, comme les aimants permanents et pour les mêmes raisons, aucune influence sur la valeur de la force directrice moyenne.

Changement de la déviation semi-circulaire totale. — Nous pouvons déjà pressentir combien les changements de la déviation semi-circulaire seront compliqués, puisqu'elle provient de deux forces perturbatrices qui suivent des lois différentes. La première, celle qui émane du magnétisme sous-permanent, peut être considérée comme constante, tandis que la seconde varie avec la position du navire à la surface du globe. Enfin, il ne faut pas oublier que la force directrice normale de l'aiguille, celle qui provient du couple terrestre et s'oppose à la déviation, dépend elle-même de l'endroit où se trouve le bâtiment, et que c'est de la composition de ces trois genres de forces que dépend en somme la déviation.

Appareil de M. Neumayer. — Le directeur de l'observatoire de Hambourg, M. Neumayer, a imaginé un appareil très simple et relativement peu coûteux destiné à montrer, par l'expérience, l'action des trois barreaux aimantés et des tiges de fer doux a, b, c, etc., sur une aiguille aimantée. Il serait bien à désirer que cet appareil fût adopté dans l'enseignement de l'École Navale et des Écoles d'hydrographie, car il simplifierait notablement l'exposition de la théorie des déviations et la rendrait beaucoup plus aisée à bien comprendre[1]

CHAPITRE III

FORMULES DE LA DÉVIATION
COEFFICIENTS EXACTS ET APPROCHÉS
MÉTHODE POUR CALCULER CES COEFFICIENTS

Relation entre le cap du bâtiment et la déviation produite par le fer doux. — Nous n'avons jusqu'à présent trouvé que le sens et la loi générale de la déviation produite par le fer doux; pour en obtenir la grandeur, nous aurons recours à une nouvelle hypothèse dont l'exactitude a d'ailleurs été démontrée par l'accord avec l'expérience, des conséquences que Poisson et sir Airy en ont tirées par le calcul. Nous supposerons désormais que, quand une tige de fer doux est soumise à l'action d'une force magnétique, le magnétisme induit qu'elle contracte est proportionnel d'abord à l'intensité de la force inductrice, ensuite à un certain coefficient ou paramètre constant, qui dépend de la nature même du fer dont la tige est faite; nous adopterons l'expression de paramètre, réservant celle de coefficient pour d'autres quantités que nous introduirons dans la suite.

Notre nouvelle hypothèse étant admise, il est clair que, quand la

1. Voyez à la fin du volume la note qui concerne cet appareil et celui du Bureau de Navigation des États-Unis.

tige a fait avec le méridien magnétique un angle ζ, l'intensité du magnétisme induit qu'elle contracte alors sous l'influence de la terre sera représentée par $a\mathrm{H}\cos\zeta$: a étant le paramètre constant qui convient à la tige a. En effet, dans cette position la force inductrice de la terre n'agit sur la tige que par celle de ses composantes qui est dirigée suivant la tige même soit $\mathrm{H}\cos\zeta$, la composante perpendiculaire n'ayant aucune action.

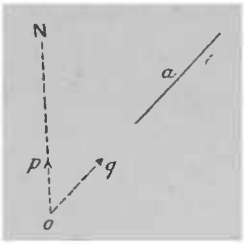


Fig. 19.

Cette force $a\mathrm{H}\cos\zeta$ ou oq (*fig.* 19) agit dans la direction oa, et, pour avoir la déviation qu'elle produit, il faut, comme nous avons fait précédemment pour les aimants, la décomposer en deux autres, l'une dirigée vers le Nord magnétique, l'autre vers l'Est magnétique.

La première op sera égale à $a\mathrm{H}\cos^2\zeta$ ou $\frac{1}{2}a\mathrm{H}(1+\cos 2\zeta)$;

la seconde pq sera égale à $a\mathrm{H}\cos\zeta\times\sin\zeta$ ou $\frac{1}{2}a\mathrm{H}\sin 2\zeta$.

Et par suite, d'après le raisonnement fait à propos de la figure 14, nous aurons pour la déviation produite par la tige a :

$$(4)\qquad \operatorname{tang}\delta = \frac{\frac{1}{2}a\mathrm{H}\sin 2\zeta}{\mathrm{H}+\frac{1}{2}a\mathrm{H}(1+\cos 2\zeta)}.$$

Si donc nous supposons que l'action de la tige a s'ajoute à celle des aimants permanents P et Q page (49), nous voyons que cette action aura pour effet d'ajouter une force égale et parallèle à oq, aux trois forces que nous devrions déjà composer pour avoir la direction finale de l'aiguille et par suite la déviation.

Cette force oq ajoute au numérateur de tang δ le terme

$$\frac{1}{2}a\mathrm{H}\sin 2\zeta$$

et au dénominateur le terme $\frac{1}{2}a\mathrm{H}(1+\cos 2\zeta)$.

En supposant qu'on introduise successivement chacune des autres tiges horizontales, on verra de la même manière que chacune d'elles introduit un nouveau terme au numérateur et au dénominateur de tang δ, termes qu'il est aisé de calculer.

Ainsi en appliquant le même raisonnement aux tiges de fer doux représentées Pl. I, on voit que la tige c, de la *fig.* 5, ajoute au numérateur de tang δ le terme:. $-\frac{1}{2}e\,\mathrm{H}\sin 2\zeta$

et au dénominateur: $\left[+\frac{1}{2}e\,\mathrm{H}\,(1-\cos 2\zeta)\right]$.

Nous entourerons d'une parenthèse tous les termes du dénominateur afin de les distinguer et rassembler plus facilement.

La tige b (*fig.* 4) ajoute au numérateur le terme: $-\frac{1}{2}b\,\mathrm{H}\,(1-\cos 2\zeta)$

et au dénominateur: $\left[-\frac{1}{2}b\,\mathrm{H}\sin 2\zeta\right]$.

La tige d (*fig.* 2) ajoute au numérateur le terme: $+\frac{1}{2}d\,\mathrm{H}\,(1+\cos 2\zeta)$

et au dénominateur : $\left[-\frac{1}{2}d\sin 2\zeta\right]$.

La tige c, de la *fig.* 7, ajoute au numérateur le terme : $+c\mathrm{Z}\sin\zeta$,
et au dénominateur : $[+c\mathrm{Z}\cos\zeta]$.

Et la tige f, de la *fig.* 8, ajoute au numérateur: $+f\mathrm{Z}\cos\zeta$,
et au dénominateur : $[-f\mathrm{Z}\sin\zeta]$,
puisque c'est la force Z qui aimante les tiges c et f.

En réunissant tous ces termes à ceux qui sont dus à l'action des aimants permanents, et en rassemblant les termes qui contiennent les mêmes lignes trigonométriques de ζ, nous aurons :

$$(5)\quad \operatorname{tang}\delta=\frac{\frac{1}{2}(d-b)\,\mathrm{H}+\sin\zeta\,(c\mathrm{Z}+\mathrm{P})+\cos\zeta\,(f\mathrm{Z}+\mathrm{Q})+\sin 2\zeta\,\frac{1}{2}(a-e)\,\mathrm{H}+\cos 2\zeta.\frac{1}{2}(d+b)\,\mathrm{H}}{\mathrm{H}+\frac{1}{2}(a+e)\,\mathrm{H}-\sin\zeta\,(f\mathrm{Z}+\mathrm{Q})+\cos\zeta\,(c\mathrm{Z}+\mathrm{P})-\sin 2\zeta\,\frac{1}{2}(d+b)\,\mathrm{H}+\cos 2\zeta.\frac{1}{2}(a-e)\,\mathrm{H}}$$

Si nous divisons tous les termes de cette fraction, d'abord par H puis par $1+\frac{a+e}{2}$, nous aurons, en nous rappelant que

$$\mathrm{Z}=\mathrm{H}\operatorname{tang}\theta$$

et en posant :

$$(6)\quad \left\{\begin{array}{lll}\lambda=1+\frac{a+e}{2} & \mathfrak{A}=\frac{1}{\lambda}\frac{d-b}{2} & \mathfrak{B}=\frac{1}{\lambda}\left(c\operatorname{tang}\theta+\frac{\mathrm{P}}{\mathrm{H}}\right)\\ \mathfrak{D}=\frac{1}{\lambda}\frac{a-e}{2} & \mathfrak{E}=\frac{1}{\lambda}\frac{d+b}{2} & \mathfrak{C}=\frac{1}{\lambda}\left(f\operatorname{tang}\theta+\frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{H}}\right)\end{array}\right.$$

$$(7)\quad \operatorname{tang}\delta=\frac{\mathfrak{A}+\mathfrak{B}\sin\zeta+\mathfrak{C}\cos\zeta+\mathfrak{D}\sin 2\zeta+\mathfrak{E}\cos 2\zeta}{1+\mathfrak{B}\cos\zeta-\mathfrak{C}\sin\zeta+\mathfrak{D}\cos 2\zeta-\mathfrak{E}\sin 2\zeta.}$$

Les six coefficients λ, $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$, s'appellent les coefficients exacts de la déviation.

La manière même dont nous avons obtenu l'expression de tang δ (formule 5) nous montre que, si nous appelons H' la résultante de toutes les forces magnétiques qui à bord agissent sur l'aiguille, le numérateur de cette fraction nous donne la composante de cette force totale vers l'Est, ou $H' \sin \delta$, tandis que le dénominateur est l'expression de la composante de cette même force dirigée vers le Nord magnétique ou $H' \cos \delta$.

Nous aurons donc pour les expressions de ces deux composantes correspondant au cap magnétique ζ du bâtiment (en les divisant toutes deux par λH pour bien mettre les coefficients en évidence dans le second membre) les deux formules suivantes :
composante de la force directrice à bord vers le Nord magnétique,

$$(8) \quad \frac{H'}{\lambda H} \cos \delta = 1 + \mathfrak{B} \cos \zeta - \mathfrak{C} \sin \zeta + \mathfrak{D} \cos 2\zeta - \mathfrak{E} \sin 2\zeta;$$

composante de la force directrice à bord vers l'Est magnétique,

$$(9) \quad \frac{H'}{\lambda H} \sin \delta = \mathfrak{A} + \mathfrak{B} \sin \zeta + \mathfrak{C} \cos \zeta + \mathfrak{D} \sin 2\zeta + \mathfrak{E} \cos 2\zeta.$$

Reprenons maintenant l'équation (7), remplaçons tang δ par $\frac{\sin \delta}{\cos \delta}$ et effectuons les calculs en remarquant que $\delta = \zeta - \zeta'$, si nous désignons par ζ' le cap au compas, on aura :

$$(9\,bis) \left\{ \begin{aligned} \sin \delta &= \mathfrak{A} \cos \delta + \mathfrak{B} \sin \zeta' + \mathfrak{C} \cos \zeta' + \mathfrak{D} \sin(\zeta + \zeta') + \mathfrak{E} \cos(\zeta + \zeta') \\ &= \mathfrak{A} \cos \delta + \mathfrak{B} \sin \zeta' + \mathfrak{C} \cos \zeta' + \mathfrak{D} \sin(2\zeta' + \delta) + \mathfrak{E} \cos(2\zeta' + \delta); \end{aligned} \right.$$

ou :

$$(10) \left\{ \begin{aligned} \sin \delta (1 - \mathfrak{D} \cos 2\zeta' + \mathfrak{E} \sin 2\zeta') = \cos \delta (\mathfrak{A} + \mathfrak{D} \sin 2\zeta' + \mathfrak{E} \cos 2\zeta') \\ + \mathfrak{B} \sin \zeta' + \mathfrak{C} \cos \zeta', \end{aligned} \right.$$

ou, en supposant δ assez petit pour qu'on puisse remplacer le sinus par l'arc, cos δ par 1, et négliger le produit $\delta \times \mathfrak{E} \sin 2\zeta'$:

$$(10\,bis) \quad \delta = \frac{\mathfrak{A} + \mathfrak{B} \sin \zeta' + \mathfrak{C} \cos \zeta' + \mathfrak{D} \sin 2\zeta' + \mathfrak{E} \cos 2\zeta'}{1 - \mathfrak{D} \cos 2\zeta'}.$$

Au moyen de substitutions et de développements successifs trop longs pour trouver place ici, la formule 10 donne :

$$(11) \quad \begin{aligned} \delta = A + B \sin \zeta' + C \cos \zeta' + D \sin 2\zeta' + E \cos 2\zeta' + F \sin 3\zeta' \\ + G \cos 3\zeta' + H \sin 4\zeta' + K \cos 4\zeta' + \qquad \text{etc.}, \end{aligned}$$

qui ne contient plus que le cap au compas et où tous les coefficients qui dépendent seulement des cinq coefficients exacts et de λ sont, ainsi que δ, exprimés en degrés.

Remarquons en passant que si nous n'avions pas voulu indiquer les relations étroites et indispensables à connaître des coefficients exacts avec les forces magnétiques émanées tant des aimants que du fer doux du navire, nous aurions pu écrire de suite l'équation (11) sans passer par l'intermédiaire de la formule (10). En effet, puisque la déviation du compas dépend des forces magnétiques provenant du navire, et que la grandeur et la direction de ces forces dépendait de la position des pièces de fer dont elles émanent, par rapport au globe terrestre et à la rose, il est clair que, quand les positions relatives de ces différents corps seront les mêmes, la déviation sera la même. Autrement dit, quand le navire, sans changer sensiblement de place, reprend le même cap, la déviation reprend la même valeur.

La déviation est donc un phénomène périodique, et, par suite, elle peut se représenter par la série qui constitue le second membre de l'équation (11), et n'est qu'une forme particulière de la série bien connue sous le nom de série de Fourier, du nom du mathématicien français qui le premier en montra toutes les ressources et toute l'importance dans l'étude des phénomènes naturels [1]

Quand les déviations sont inférieures à 20°, on peut, sans erreur appréciable dans la pratique, limiter cette formule aux cinq premiers termes et écrire :

$$(12) \qquad \delta = A + B\sin\zeta' + C\cos\zeta' + D\sin 2\zeta' + E\cos 2\zeta'.$$

Les cinq coefficients A, B, C, D, E sont appelés les coefficients approchés de la déviation, pour bien indiquer qu'ils n'ont été obtenus qu'en faisant sur les valeurs absolues des déviations une hypothèse nouvelle.

Entre les coefficients exacts et les coefficients approchés existent des relations simples que nous donnons plus loin. Pour l'intelligence de ce qui va suivre, il nous suffira d'admettre que, quand les déviations ont des valeurs peu considérables, les coefficients exacts sont à peu de chose près les sinus naturels des arcs correspondants, c'est-à-dire que $\mathfrak{A}$ est le sinus de l'arc de A°, $\mathfrak{D}$ le sinus de l'arc de D°, etc.

On s'en rend compte d'ailleurs d'une manière grossière en supposant que dans la formule (10) on remplace $\cos\delta$ par 1, $\sin\delta$ par δ, tandis qu'on néglige dans le premier terme le produit :
$\delta(-\mathfrak{D}\cos 2\zeta' + \mathfrak{E}\sin 2\zeta')$, substitutions et approximations permises, quand les hypothèses précédentes sont réalisées.

Cela posé, l'équation (12) nous donne de suite des conséquences importantes.

1. De plus, nous n'aurions pas su, en procédant ainsi, que tous les coefficients de la formule 11 dépendent seulement des cinq coefficients exacts et de λ.

Déviation constante. — Coefficient constant A. — Le premier terme A est indépendant du cap, il y a donc une partie de la déviation qui est invariable quel que soit le cap. On lui a donné le nom de *Déviation constante*. Or A provient de $\mathfrak{A}$, dont le numérateur est $d - b$. D'ailleurs ces deux quantités d et b, qui représentent le fer doux horizontal du bâtiment, qui n'est pas symétrique par rapport au plan longitudinal, entrent aussi dans le coefficient de déviation quadrantale $\mathfrak{E}$ ou E. Il en résulte que tout fer doux situé dans une position semblable donne lieu non seulement à une déviation constante, mais aussi à une déviation quadrantale.

En général le fer doux est symétrique par rapport au plan longitudinal, dans ce cas d et b sont nuls ainsi que A et E.

Quand il n'en est pas ainsi, d et b ont de très petites valeurs, et on peut presque toujours négliger E et le supposer nul. Il semblerait à première vue qu'on puisse de même négliger A, mais il n'en est rien, car A représente, avons-nous dit, la partie constante de la déviation et, par suite, non pas seulement celle qui provient d'un manque de symétrie de fer doux, mais celle qui provient de toutes les erreurs systématiques d'observation, qu'elles soient instrumentales ou personnelles à l'observateur.

Telles sont, par exemple : l'erreur commise quand on prend pour la déclinaison du lieu une valeur erronée ; les erreurs produites par l'irrégularité des divisions de la rose, par l'excentricité du pivot de la rose par rapport à la circonférence de celle-ci, enfin toutes les erreurs systématiques de lecture et de pointé faites par l'observateur.

Toutes ces erreurs réunies donneront donc souvent à A une valeur dont on devra tenir compte, alors que théoriquement il devrait être comme E ou rigoureusement nul ou au moins assez petit pour pouvoir être négligé. Cette valeur de A qui tient aux erreurs d'observation de toute nature, et non au fer doux, atteint souvent 1° et s'appelle la Déviation constante « apparente ».

Déviation quadrantale, — Sa constance pour un cap donné. — Coefficients constants D et E. — Les deux termes $D \sin 2\zeta' + E \cos 2\zeta'$ représentent la partie quadrantale de la déviation.

En nous reportant aux équations (5), à ce que nous avons dit de la constance des paramètres qui entrent dans la valeur des coefficients $\mathfrak{D}$ et $\mathfrak{E}$, comme aussi à l'équation (4) où H disparaît, comme facteur commun au dénominateur et au numérateur, nous voyons que cette partie de la déviation ne dépend que de a, e, d, b et λ, coefficients constants, et que par suite la déviation quadrantale, pour un cap donné, est constante, quelle que soit la position géographique du navire.

Ce qu'on exprime parfois d'une manière abrégée et inexacte en disant : La déviation quadrantale est constante. Il faut, en parlant ainsi, sous-entendre qu'on ne s'occupe que des coefficients D et E qui sont réellement constants.

Maximum de la déviation quadrantale. — L'expression de la déviation quadrantale peut se mettre sous la forme:

(13) $D\left(\sin 2\zeta' + \frac{E}{D}\cos 2\zeta'\right)$; ou, en posant : $\frac{E}{D} = \operatorname{tang} 2\beta$,

$\frac{D}{\cos 2\beta}\sin 2(\zeta' + \beta)$, et sous cette forme on voit qu'elle est maxima en valeur absolue, quand $2(\zeta' + \beta)$ égale 90 ou 270 degrés, et que ce maximum n'est autre chose que : $\sqrt{D^2 + E^2}$ affecté du signe + ou du signe —, suivant la valeur de $2(\zeta' + \beta)$, puisque pour ces valeurs particulières de ζ' : $\cos 2\beta = \pm \frac{D}{\sqrt{D^2 + E^2}}$.

Déviation quadrantale positive. — Coefficient D. — En général, le coefficient E est négligeable ou tellement petit, que son influence disparaît devant celle du coefficient D; en considérant ce dernier seulement, à l'exclusion de E, et en remarquant qu'il est toujours positif, on dit parfois que « la déviation quadrantale est positive » ; expression tout à fait impropre, puisqu'elle veut dire seulement : le coefficient principal de la déviation quadrantale est positif. Il est bien évident que cette déviation, par cela même qu'elle est quadrantale, est alternativement positive et négative dans les quatre quadrants.

Quand on examine de plus près son signe, on voit que, dans le cas qui nous occupe, celui où D est positif, elle est positive dans les quadrants NE et SO, où le cap lui-même, d'après les conventions ordinaires en marine (celle de compter les caps de 0 à 90 degrés, en partant du Nord ou du Sud) est lui-même positif. Cette déviation est au contraire négative, dans les quadrants N O et S E, qui sont ceux où l'on compte négativement l'angle qui représente le cap du bâtiment, compté d'après les conventions précédentes. C'est, en somme, l'identité de ces deux signes du cap et de la déviation quadrantale à ce cap, qu'on exprime par la locution impropre citée plus haut, et qui ne peut donner lieu à aucune erreur, dès que l'on est parfaitement fixé sur son sens exact.

Sur les navires en bois, la déviation quadrantale, ou mieux **D**, dépasse rarement 2 degrés; dans des bâtiments en fer, elle a atteint 6 à 7 degrés; enfin, dans des navires de guerre cuirassés, elle est arrivée quelquefois jusqu'à 10 degrés et même, pour des compas mal placés, 14 ou 15 degrés. Mais ces deux dernières valeurs sont rares, et en général D est compris entre 5 et 10 degrés pour les navires à vapeur construits en fer, et à bord desquels on a pris les précautions nécessaires pour l'installation du compas.

Déviation semi-circulaire. — Coefficients variables B et C. — L'ensemble des deux termes $B \sin \zeta' + C \cos \zeta'$ représente la partie de la déviation qui est semi-circulaire.

En la mettant sous la forme

$$B\left(\sin \zeta' + \frac{C}{B} \cos \zeta'\right) \tag{14}$$

et en posant : $\frac{C}{B} = \operatorname{tang} \alpha$; elle s'écrit : $\frac{B}{\cos \alpha} \sin (\zeta' + \alpha)$,

ou :

$$\sqrt{B^2 + C^2} \sin (\zeta' + \alpha),$$

puisque :

$$\cos \alpha = \frac{B}{\sqrt{B^2 + C^2}};$$

et, sous cette forme, on voit qu'elle est maxima en valeur absolue quand $\zeta' + \alpha$ est égal à 90 ou à 270 degrés. Ce maximum est égal à $\sqrt{B^2 + C^2}$ affecté du signe $+$ ou du signe $-$, suivant la valeur de $\zeta' + \alpha$ C'est en réunissant ainsi en un seul les deux termes de la déviation semi-circulaire que sir Sabine arrivait à trouver la valeur de ce coefficient unique par deux observations d'écart de la boussole faites au cap $180° + \alpha$ et α.

Dans les navires en bois, ce maximum dépasse rarement 10 degrés; dans les navires en fer il a atteint souvent 20 degrés : quelquefois même, dans les navires cuirassés, il a dépassé cette valeur pour atteindre 30 et 40 degrés et rendre l'usage du compas fort délicat et parfois même impossible, à moins d'appliquer les méthodes de compensation.

En se reportant aux équations (5) qui donnent les valeurs de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, on voit que ce sont des quantités fort complexes. Elles dépendent, en effet, des éléments du magnétisme terrestre correspondant au lieu où se trouve le bâtiment, par les quantités H et θ ; du magnétisme sous-permanent du navire, par les quantités P et Q, enfin du magnétisme induit dans le fer doux vertical du bâtiment par les paramètres c et f qui représentent ce fer doux.

En supposant d'abord pour plus de simplicité que l'état magnétique du bâtiment est très voisin de son état d'équilibre définitif, on peut admettre que les quantités c et f d'une part, et d'autre part P et Q surtout, sont des quantités constantes. Et dès lors les coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ ne varieront plus qu'avec la position géographique du bâtiment qui fait varier H et θ.

Différence entre $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. — Remarquons d'abord que les variations de $\mathfrak{C}$ seront, en général, moins considérables que celles de $\mathfrak{B}$; car ce coefficient dépend de f qui représente du fer doux vertical dissymétrique par rapport au plan longitudinal du navire. Or, en général, il y a symétrie parfaite ou très approchée du fer doux par rapport à ce plan, f est donc nul ou fort petit. Il n'en est pas de même de c.

Séparation des deux parties de ces deux coefficients. — Quoi qu'il en soit, une fois que le bâtiment aura atteint un état magnétique stable, on obtiendra facilement les valeurs des deux parties différentes des coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$; pour cela, il suffira de les calculer dans deux endroits différents.

Soit, par exemple, $\mathfrak{B}$ la valeur qui convient à un lieu défini par les quantités H et θ, $\mathfrak{B}_1$ la valeur qui correspond à un autre lieu terrestre défini par H_1 et θ_1, on aura évidemment :

$$(15) \qquad \left\{ \begin{aligned} &\frac{P}{\lambda} + \frac{c}{\lambda} H \operatorname{tang} \theta = \mathfrak{B} H. \\ &\frac{P}{\lambda} + \frac{c}{\lambda} H_1 \operatorname{tang} \theta_1 = \mathfrak{B}_1 H_1 \end{aligned} \right.$$

d'où on tire :

$$\frac{c}{\lambda} = \frac{\mathfrak{B}_1 H_1 - \mathfrak{B} H}{H_1 \operatorname{tang} \theta_1 - H \operatorname{tang} \theta}$$

et :

$$\frac{P}{\lambda} = \frac{\mathfrak{B} H H_1 \operatorname{tang} \theta_1 - \mathfrak{B}_1 H_1 H \operatorname{tang} \theta}{H_1 \operatorname{tang} \theta_1 - H \operatorname{tang} \theta}$$

Des équations analogues pour $\mathfrak{C}$ donneraient $\frac{Q}{\lambda}$ et $\frac{f}{\lambda}$.

Quand on aura pu obtenir les deux parties de chacun de ces coefficients, on pourra ensuite, lorsqu'on n'aura pas le temps ou la possibilité de faire des observations directes, trouver la valeur des coefficients qui conviennent à une position nouvelle du navire.

Il suffira pour cela de multiplier les quantités $\frac{P}{\lambda}$ et $\frac{Q}{\lambda}$ par $\frac{1}{H}$ et les quantités $\frac{c}{\lambda}$ et $\frac{f}{\lambda}$ par tang θ ; H et θ étant les éléments du magnétisme terrestre qui correspondent au lieu considéré et dont les valeurs seront données par les cartcs magnétiques placées à la fin du volume. Ce qui précède montre qu'il faudra suivre avec grand soin les variations de ces deux coefficients, puisque leur valeur dépend d'éléments si divers.

Du coefficient λ. — Afin de pouvoir passer directement de la première partie de cet ouvrage à la quatrième, où nous avons donné les règles de compensation des compas, nous dirons ici quelques mots du coefficient λ que rcprésente d'après nos notations la quantité constante :

$$1+\frac{a+e}{2}.$$

La formule simplifiée de la déviation n'exige pour calculer λ à un cap quelconque que les cinq coefficients A, B, C, D, E, mais, dans certains cas particuliers, on arrive plus rapidement au résultat quand on connaît par surcroît le coefficient λ, et, comme il joue, d'ailleurs, un rôle important dans la théorie des compas, il est bon de savoir au juste ce qu'il représente.

Si nous nous reportons à l'équation (8), nous verrons aisément que λ n'est autre chose que la moyenne des valeurs que prend la quantité $\frac{H'}{H}\cos\delta$ quand le cap du navire décrit la rose entière. Il suffit pour cela de faire passer λ dans le second membre de l'équation, de donner successivement à ζ un nombre quelconque de valeurs équidistantes comprises entrc 0 et 360 degrés, et de former les équations en nombre égal qui correspondent à ces valeurs particulières de ζ. En additionnant ces équations que nous supposerons au nombre de n et en se rappelant que les sommes de sinus ct cosinus d'arcs en progressions arithmétiques sont nulles, de même que les sommes des sinus et cosinus du double de ces arcs quand ces derniers sont compris cntre 0 et 360 degrés, on obtient ainsi :

$$(16)\qquad \lambda=\frac{\frac{H'_0}{H}\cos\delta_0+\frac{H'_1}{H}\cos\delta_1+\text{etc.}}{n},$$

or $\frac{H'\cos\delta}{H}$ représente la composante vers le nord de la force directrice de l'aiguille du compas à bord, exprimée en parties de la force horizontale terrestre H; par conséquent, l'équation précédente nous montre que λ représente ce que nous avons appelé la force directrice moyenne vers le nord de l'aiguille aimantée à bord.

Calcul des coefficients. — Il faut remarquer que nous ne saurions obtenir les valeurs des coefficients exacts (et par suite celle des coefficients approchés dont ils sont à peu près les sinus naturels) au moyen des équations (6). Les seconds membres de ces équations contiennent, en effet, les paramètres constants a, b, c, etc., qui représentent l'influence du fer doux. Or, dans l'état actuel et fort imparfait de nos connaissances sur le magnétisme, nous ne pouvons pas calculer *à priori* la valeur de ces paramètres. Nous savons seulement que la théorie vérifiée par l'expérience permet de les considérer comme des constantes.

Nous devons donc suivre, dans la pratique, une marche inverse de celle qui aurait semblé la plus logique à première vue. Au lieu de déterminer les coefficients au moyen des paramètres calculés *à priori* par des équations données par la théorie et de déduire de ces coefficients la déviation à un cap quelconque en donnant la valeur correspondante à ζ ou ζ', dans les équations (7) ou (12); nous observerons, au contraire, la déviation δ de l'aiguille aimantée à un nombre de caps suffisant pour nous permettre de calculer ensuite les coefficients. Nous verrons plus tard combien la connaissance de ces derniers, même obtenue de cette façon indirecte, simplifie encore le problème des déviations du compas.

CHAPITRE IV

CAUSE DES DIVERGENCES OBSERVÉES ENTRE LA THÉORIE ET LA PRATIQUE

Il convient de rassembler les diverses hypothèses faites successivement afin de montrer sous quelles conditions les formules précédentes peuvent être employées et comment, en examinant le degré d'exactitude de chaque hypothèse, on peut aisément rendre compte de certaines irrégularités observées qu'on attribue encore parfois, et bien à tort, à l'imperfection de la théorie.

Nous avons supposé :

1° Que la longueur de l'aiguille est infiniment petite ou au moins négligeable relativement à la distance qui la sépare du fer le plus voisin;

2° Que le magnétisme du navire est composé en partie de magnétisme permanent dû au fer dur et en partie de magnétisme induit et passager dû au fer doux :

3° Que le magnétisme induit est proportionnel à l'intensité de la force inductrice;

4° Que le magnétisme de l'aiguille aimantée de la rose était constant. Cette dernière hypothèse est, en général, remplie et nous ne nous en occuperons plus. Nous l'avons indiquée ici pour rappeler aux marins, qui l'oublient parfois, combien il est essentiel qu'elle soit satisfaite et les engager à ne s'adresser pour leurs compas qu'à des constructeurs éprouvés.

Nous allons examiner successivement ce que produit dans la pratique le manque d'exactitude de chacune des trois autres hypothèses fondamentales.

Influence de la longueur de l'aiguille aimantée. — Déviations sextantale et octantale. — Quand la longueur de l'aiguille aimantée n'est pas assez petite pour qu'on puisse la négliger vis-à-vis des distances qui les séparent des pièces de fer les plus voisines, la formule simplifiée des déviations n'est plus applicable, et il faut la compléter par quatre termes :

$$F \sin 3\zeta' + G \cos 3\zeta' + H \sin 4\zeta' + K \cos 4\zeta'.$$

Les deux premiers proviennent du voisinage trop rapproché des aimants permanents et représentent une déviation *sextantale*, c'est-à-dire une déviation qui, conservant le même signe dans un secteur égal au sixième de la rose, change de signe en passant par zéro quand le cap passe d'un secteur dans un autre et a un maximum dans chacun des secteurs.

Les deux derniers termes proviennent du voisinage trop rapproché des pièces de fer doux et représentent une déviation *octantale*, c'est-à-dire une déviation conservant le même signe dans un secteur égal au huitième de la circonférence, changeant de signe en passant par zéro quand on passe d'un secteur dans l'autre et ayant un maximum dans chacun d'eux.

Dans un mémoire inséré en 1861 dans les *Transactions philosophiques de la Société Royale de Londres*, Sir Archibald Smith et le capitaine Evans ont étudié, à la fois par l'expérience et la théorie, l'influence de la distance des aimants et du fer doux, placés de diverses manières, sur des roses de compas construites de différentes façons et ayant une ou plusieurs aiguilles de diverses longueurs.

Ils ont employé dans leurs expériences trois roses à aiguille unique, dont la longueur était respectivement, en prenant le mètre pour unité de longueur, 0,076; 0,152 et 0,304; et une rose à quatre aiguilles parallèles, égales deux à deux. Les plus longues avaient 0,178 et étaient placées chacune à 15 degrés du diamètre de la rose; les deux autres avaient 0,095, elles étaient placées extérieurement aux deux autres et à 30 degrés de chacune d'elle, soit à 45 degrés du diamètre.

Ces roses ont été soumises à l'action de barreaux aimantés placés à diverses distances de la rose, d'abord dans son plan même, puis en dehors de ce plan.

Dans le plan même de la rose, ils occupaient deux positions différentes suivant qu'on les mettait dans le sens de la longueur de l'aiguille ou par son travers.

Enfin, les deux savants étudièrent l'influence de la distance de cylindres de fer doux suivant qu'ils agissaient sur une rose à aiguilles multiples semblable à la précédente, ou sur une rose à aiguille unique de 0,20.

Voici les résultats qu'ils obtinrent :

1° Action des barreaux aimantés placés dans le même plan que la rose et à des distances respectives de celle-ci égales à 0,45 et de 0,48.

Dans ce cas, avec l'aiguille unique de 0,076, la déviation est presque rigoureusement semi-circulaire, avec les aiguilles de 0,152 et 0,304, la déviation semi-circulaire augmente et on a de plus une erreur sextantale considérable. L'accroissement de la déviation semi-circulaire est proportionnelle au carré de la longueur de l'aiguille.

Fait remarquable, la déviation sextantale est nulle pour la rose à aiguilles multiples.

2° Déviations produites par des barreaux placés hors du plan de la rose.

Lorsque la différence de niveau est plus petite que la moitié de la distance horizontale entre la rose et le barreau, la déviation semi-circulaire augmente avec la longueur de l'aiguille. Elle diminue, au contraire, quand la différence de niveau est plus grande que cette dernière distance horizontale.

Avec l'aiguille unique de $0^m,076$, la déviation dans chaque cas a été presque semi-circulaire. Avec l'aiguille unique de $0^m,304$, mise à 50 centimètres du barreau dans le sens vertical et à 16 centimètres dans le sens horizontal, la déviation était presque semi-circulaire avec une légère tendance à admettre une partie sextantale.

Dans les mêmes conditions, l'erreur sextantale était nulle pour la rose à quatre aiguilles.

3° Action du fer doux au même niveau que l'aiguille.

Avec une seule aiguille, pas de déviation sextantale, mais une déviation octantale considérable qui disparaît avec la rose à quatre aiguilles.

La théorie rend compte de tous ces phénomènes ; de plus, elle a montré la première, et l'expérience a confirmé, que la déviation sextantale causée sur une aiguille unique par un aimant placé au même niveau qu'elle peut être annulée, si on emploie deux barreaux égaux, semblablement placés quant à ce qui regarde l'aiguille et formant chacun un triangle équilatéral avec le centre du compas. Une pareille disposition de barreaux donne seulement une déviation semi-circulaire.

Ainsi, au même niveau que la rose, un aimant donne lieu à une déviation sextantale sensible dès que la distance du centre de l'aiguille au centre du barreau est égale à six fois la longueur de l'aiguille.

Quand le barreau n'est pas au même niveau que la rose, on peut le rapprocher notablement, mais il ne faut pas qu'en joignant le centre de l'aiguille au centre du barreau et en élevant de ce dernier point une perpendiculaire à cette droite, cette perpendiculaire vienne percer le plan de la rose à une distance du centre de la rose moindre de six fois la longueur de l'aiguille.

En résumé, une trop grande longueur de l'aiguille aimantée peut donner lieu à des erreurs sextantales et octantales qui, à égalité de diamètre de la rose, disparaissent quand, au lieu de la munir d'une aiguille unique, on y adapte, soit deux aiguilles parallèles, placées symétriquement par rapport au centre et à 15 degrés du diamètre qui leur est parallèle, soit encore quatre aiguilles parallèles disposées comme nous l'avons dit plus haut. On verra plus loin que, par une heureuse coïncidence, cette même disposition d'aiguille est celle qui assure à la rose les conditions de stabilité les plus favorables.

Examinons maintenant les conséquences de l'imparfaite exactitude de notre deuxième et de notre troisième hypothèse, qui sont, en quelque sorte, corrélatives.

Imparfaite douceur du fer. — 1° Influence du cap de construction. — Pendant la construction d'un bâtiment, les pièces de fer qui le composent restent longtemps dans la même position et, de plus, y sont soumises à diverses actions mécaniques, martelage, rivetage, ajustage, qui favorisent le développement de ce que nous avons appelé le magnétisme sous-permanent.

L'intensité et la polarité magnétiques prises par le fer imparfaitement dur sous l'action terrestre dépendant de l'orientation qu'il a par rapport à la terre, on conçoit que la direction du cap du bâtiment, pendant la construction, exerce une influence considérable sur le magnétisme sous-permanent du navire.

Pour se faire une idée de la distribution de ce magnétisme, considérons dans le navire le point qui, par rapport aux pièces de fer de toutes sortes, occupe une position à peu près centrale; en général, il est situé dans les environs du maître couple, à mi-hauteur environ du navire.

Menons par ce point un plan perpendiculaire à l'aiguille d'inclinaison; d'après ce que nous avons dit précédemment, on doit s'attendre à voir la polarité boréale ou bleue prédominer dans la partie du bâtiment qui est au-dessus de ce plan, tandis que la polarité australe ou rouge dominera dans la partie qui est au-dessous. Si on imagine que le navire tourne autour de la verticale passant par ce point de manière que son cap parcoure successivement l'horizon, dans chacune des positions qu'il occupera, le plan parallèle à l'équateur magnétique que nous avons considéré séparera le bâtiment en deux parties, qui dépendront du cap, et dont les polarités seront distribuées comme nous l'avons indiqué plus haut.

Le compas subissant d'une façon prédominante l'action de la polarité la plus voisine, on conçoit que la connaissance du cap, pendant la construction, permette de pressentir quelle sera la nature des déviations d'un compas placé dans une situation déterminée.

D'une façon générale, on peut dire que la pointe Nord de l'aiguille aimantée est attirée par la partie du bâtiment qui était Sud pendant la construction.

Quelle qu'ait été la direction du cap de construction, comme il faut avant tout, pendant les premières traversées du navire, chercher à éviter des fluctuations trop considérables dans l'état du magnétisme sous-permanent, on devra avoir soin que le cap du navire, pendant son armement, soit diamétralement opposé au cap de construction.

Nous reviendrons plus tard sur ce sujet, à propos de la place qu'il convient de choisir à bord pour le compas.

2° Influence de la route. — Nous avons déjà dit que seul le fer parfaitement doux subit instantanément l'influence terrestre, c'est-à-dire prend immédiatement l'intensité et la polarité magnétiques correspondant à la position qu'il occupe à la surface du globe, au moment considéré. Pour toute autre espèce de fer, il faut pour cela un temps plus ou moins long, durant lequel l'état magnétique du fer est intermédiaire entre celui qui convient à la position qu'il occupe actuellement et celui qu'il avait dans la position antérieure; on désigne ce phénomène sous le nom de retard dans l'induction.

Quand le bâtiment est resté longtemps sur une même route, on peut s'attendre à voir les phénomènes magnétiques dus, comme tout à l'heure, à la permanence du cap pendant la construction, se reproduire avec une intensité moindre il est vrai, mais suffisante cependant, dans le cas de certaines routes particulières, pour avoir sur les déviations du compas, quand le navire changera de cap, une influence marquée. Il est bon d'être prévenu de ce fait, afin de ne pas être porté à attribuer à des causes inconnues et capricieuses des effets qui peuvent s'expliquer naturellement par les lois ordinaires du magnétisme.

C'est ce qui arrive, par exemple, quand le navire conserve longtemps une longue route Ouest ou Est magnétiques. — Prenons le cas d'une route Ouest. Dans ce cas, l'influence de la terre développe une polarité rouge ou australe dans le côté tribord, et une polarité bleue boréale dans le côté bâbord.

Par suite, si le bâtiment met ensuite le cap au Nord, le côté tribord va repousser l'extrémité Nord de l'aiguille aimantée vers l'Ouest, tandis que le côté bâbord l'attirera du même côté, double raison pour qu'il se produise pendant quelque temps une déviation accidentelle et passagère, occidentale ou négative, qui disparaîtra au bout de plus ou moins de temps, quand le magnétisme sous-permanent aura repris l'état d'équilibre qui avait été troublé par la permanence de la route Ouest.

Quand le même navire, partant de la même route Ouest, mettra le cap au Sud, on doit s'attendre à trouver une déviation Est ou positive.

Ces déviations changeraient de signes, aux caps correspondants, si la route primitivement faite par le navire était l'Est.

De semblables effets se produiront évidemment toutes les fois que le bâtiment, ayant conservé durant longtemps un même cap cardinal magnétique, passera immédiatement ensuite à un cap perpendiculaire au premier. A cause de la grandeur relative de la longueur et de la largeur du bâtiment, cet effet est, en général, d'autant plus sensible que le cap initial du bâtiment était plus voisin de l'Est ou de l'Ouest magnétiques.

On ne peut pas dire à l'avance quel est le nombre de degrés atteint par cette erreur. Sa valeur dépend des cas particuliers. — Elle est le plus ordinairement comprise entre 1 et 3 degrés.

On observe, dans la pratique de la navigation, une erreur de ce genre, quand, après avoir fait route dans la Méditerranée à l'Ouest ou à l'Est, on remonte ensuite vers le Nord en doublant le cap Saint-Vincent, ou on descend vers le Sud dans le canal de Suez.

On observe encore cette erreur à bord des navires qui, ayant fait route à l'Est pour venir d'Amérique, mettent ensuite le cap au Nord ou au Sud pour s'engager dans le détroit de Saint-Georges.

On prétend également, sans avoir encore à ce sujet des preuves vraiment précises et probantes, qu'on doit craindre une erreur semblable à bord des navires de guerre qui ont tiré le canon en faisant route à l'Est ou à l'Ouest. En général, l'erreur provenant du tir paraît surtout à craindre, quand il aura été effectué sous voiles sans que les trépidations de la machine ou de l'hélice se soient opposées au développement du magnétisme que favorise la force coercitive donnée au fer doux par les chocs des pièces.

3° Erreur dite de Gaussin. — Cette imparfaite douceur du fer donne encore lieu à une autre erreur que M. Gaussin, ingénieur hydrographe en chef, a signalée le premier, en indiquant en même temps un moyen de la corriger.

Quand le cap du navire varie rapidement, en particulier quand on lui fait décrire le cercle entier de la rose pour procéder à la régulation des compas, les tiges de fer doux horizontales font avec le méridien des angles qui varient de 0 à 360 degrés, et, pour peu que le changement de cap du navire se fasse avec rapidité, l'imparfaite douceur du fer aura cet effet, qu'à un instant et pour un cap donnés, l'état magnétique de ces tiges sera non pas celui qu'elles devraient avoir dans leur situation actuelle, mais celui qui correspond à leur position antérieure.

En un mot, leur état magnétique ne peut varier aussi vite que le cap, et se trouve pour ainsi dire légèrement en retard sur celui-ci.

Quand le bâtiment part du cap Nord et tourne sur tribord, au moment où il a le cap magnétique ζ, l'état magnétique du fer doux correspond au cap antérieur $\zeta - s$, s étant un angle positif dont la valeur dépend de la rapidité de la rotation du navire.

Au contraire, si le navire tournait sur bâbord, et pour la même raison, l'état magnétique correspondrait au cap $\zeta + s$.

Il y a donc lieu de remplacer ζ par l'une ou l'autre de ces valeurs dans les formules précédentes. Il n'y a évidemment pas lieu de faire ces substitutions dans les facteurs trigonométriques qui multiplient c, f, k, puisque ces paramètres représentent des tiges de fer verticales, toujours soumises dans un même lieu à la même force verticale inductrice Z, durant toute une rotation du navire. — Il n'y a pas lieu également de tenir compte de la correction provenant de ce petit angle dans les facteurs qui multiplient d, b et h, puisque, ces facteurs étant toujours fort petits, leurs variations provenant de ce fait seront négligeables.

Mais il n'en est pas de même pour les tiges a, e, g. Si le navire tourne sur bâbord, c'est-à-dire de la droite vers la gauche, au moment où le cap du navire est ζ, l'état magnétique de la tige a est dû, d'après ce que nous venons de dire, non pas à la force magnétique terrestre $H \cos \zeta$, mais bien à la force $H \cos (\zeta + s)$. Il en est de même pour la tige g.

Enfin, la tige e est soumise à la composante $H \sin (\zeta + s)$. Par suite, le facteur $a \cos \zeta$ deviendra : $a \cos (\zeta + s) = a \cos \zeta - s a \sin \zeta$, puisque s est toujours assez petit pour qu'on puisse remplacer $\cos s$ par 1 et $\sin s$ par s.

Le facteur $-e \sin \zeta$ deviendra $-e \sin (\zeta + s)$ ou $-s e \cos \zeta - e \sin \zeta$.

Le facteur $g \cos (\zeta + s)$ donnera $+ g \cos \zeta - s g \sin \zeta$.

Il nous faudra donc introduire dans nos formules les trois termes correctifs $-s a \sin \zeta$, $-s e \cos \zeta$, $-s g \sin \zeta$. Or, si nous nous reportons au chapitre III, nous verrons que le premier terme $-s a \sin \zeta$, peut être regardé comme provenant d'une tige b' placée dans la position de b et telle que $b' = + s a$.

De même, le terme $-s e \cos \zeta$ peut être regardé comme provenant d'une tige d', placée dans la position de d et telle $d' = - s e$.

Enfin, le terme $-s g \sin \zeta$ peut être regardé comme provenant d'une tige h', placée dans la position de h et telle que $h' = - s g$.

C'est-à-dire qu'il faudra ajouter aux termes en b, d et h des équations, trois termes correctifs :

$$\text{l'un,}\quad b' = +sa;$$
$$\text{l'autre,}\quad d' = -se;$$
$$\text{l'autre,}\quad h' = +sg;$$

Négligeons le dernier, qui n'intervient que dans la déviation due à la bande et avec une faible influence, à cause des valeurs ordinaires de g et de la petitesse de s. Les deux premiers introduisent dans les termes $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ les changements respectifs suivants :

$$d\mathfrak{A} = -s\frac{a+e}{2\lambda} = +s\left(\frac{1}{\lambda} - 1\right);$$
$$d\mathfrak{E} = +s\frac{a-e}{2\lambda} = s\mathfrak{D}.$$

Par conséquent, une rotation du navire de la droite vers la gauche introduit dans la déviation un changement :

$$(17)\qquad -s\frac{a+e}{2\lambda} + s\frac{a-e}{2\lambda}\cos 2\zeta' = -\frac{sa}{\lambda}\sin^2\zeta' - \frac{se}{\lambda}\cos^2\zeta'.$$

Aux caps Nord et Sud, cette erreur est $-\frac{se}{\lambda}$, et comme e est généralement négatif, ce terme correctif est positif, ce dont on se rend compte en remarquant que la tige $-e$ de la *fig.* 5 *bis*, Pl. II, en arrivant à cette position, conserve encore quelque temps son état magnétique antérieur; or, à son extrémité bâbord, elle avait un pôle rouge qui va repousser l'extrémité Nord de l'aiguille; à son extrémité de tribord, elle avait un pôle bleu qui va attirer l'extrémité n de l'aiguille, qui est un pôle rouge. Les actions de ces deux extrémités s'ajouteront donc pour donner une déviation dirigée vers l'Est, c'est-à-dire positive.

On se rendrait compte de la même façon de l'erreur $-\frac{sa}{\lambda}$ qui correspond aux caps Est ou Ouest. Mais, comme $-\frac{e}{\lambda}$ est fréquemment compris entre 0,300 et 0,500, tandis que $\frac{a}{\lambda}$ dépasse rarement 0,100, la première erreur est plus considérable que la seconde.

Comme $\frac{1}{\lambda} - 1$ et $\mathfrak{D}$ sont, en général, positifs, nous arrivons à ce résultat remarquable, que, lorsqu'un navire en fer a réglé ses compas en tournant de la droite vers la gauche, la rotation seule du navire, indépendamment de toute autre cause, a introduit un coefficient $+\mathfrak{A}$ et un coefficient $+\mathfrak{E}$. Au contraire, si le navire a tourné de la gauche vers la droite, nous avons introduit un $-\mathfrak{A}$ et un $-\mathfrak{E}$.

C'est pour cela que M. Gaussin conseille, quand on compense les compas, de laisser environ 1° 30 minutes de déviation au cap Nord et Sud du compas, et environ 30 minutes de déviation au cap Est et Ouest. Cette déviation, volontairement laissée au compas, devra être positive ou Est si le navire a tourné de la droite vers la gauche, c'est-à-dire sur bâbord, et négative ou Ouest si le navire a tourné de la gauche vers la droite, c'est-à-dire sur tribord.

Remarques générales sur les variations des paramètres et des coefficients. — Tout ce que nous venons de dire sur les conséquences de l'imparfaite douceur ou dureté du fer, nous montre que les paramètres P, Q, R, qui représentent l'influence du magnétisme sous-permanent, ne pourront être regardés comme réellement constants qu'après un certain temps de service du bâtiment.

Il en sera de même pour tous les paramètres provenant du fer doux, avec cette différence capitale, toutefois, que leurs variations, même dans les premiers mois qui suivent le lancement, sont beaucoup plus petites que celles des trois paramètres précédents.

En général, on pourra, sans risquer de commettre des erreurs dangereuses, considérer λ, $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{E}$ et $\mathfrak{D}$ comme constants même de suite après le lancement. Mais ce ne sera qu'après quelques mois qu'il en sera rigoureusement ainsi, et qu'on ne trouvera dans deux déterminations successives de ces coefficients que des différences absolument insignifiantes, compatibles avec les erreurs d'observation, 20 à 30 minutes environ.

En somme, ce sont surtout les coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ qu'il faudra suivre avec soin, puisqu'ils dépendent non seulement de la position géographique du navire, mais des coefficients P, Q, R, dont les variations sont parfois considérables dans les premiers mois qui suivent le lancement du navire.

Quant à $\mathfrak{D}$, qui est après eux le coefficient le plus important, il pourra avoir de faibles variations au début du service du bâtiment, mais il atteindra très rapidement la valeur constante que la théorie lui assigne.

Afin de donner une idée des variations des coefficients de la déviation, nous empruntons aux *Philosophical transactions* de la Société Royale de Londres (année 1865) le tableau suivant des valeurs de ces coefficients déterminés à bord du navire de guerre le *Warrior* à deux époques différentes, à Greenwich en septembre 1861, peu de temps après le lancement, puis à Portland en octobre 1864.

	A	B	C	D	E	$\mathfrak{A}$	$\mathfrak{B}$	$\mathfrak{C}$	$\mathfrak{D}$	$\mathfrak{E}$	λ
1861	$+1°\ 7'$	$-24°15'$	$-7°42'$	$+9°23'$	$+0°39$	$+0{,}019$	$-0{,}449$	$-0{,}124$	$+0{,}164$	$+0{,}010$	$0{,}873$
1864	$-0°17'$	$-16°35'$	$-4°33'$	$+8°45'$	$-0°41'$	$-0{,}005$	$-0{,}307$	$-0{,}072$	$-0{,}152$	$-0{,}012$	$0{,}860$

CHAPITRE V

INFLUENCE DE LA BANDE SUR LA DÉVIATION

Considérations générales. — Tout ce que nous avons dit jusqu'à présent s'applique au cas où le bâtiment est droit sur sa quille; s'il vient à s'incliner, les aimants qui représentent le magnétisme sous-permanent du navire, et les tiges de fer doux qui représentent le magnétisme induit, vont changer de position à la fois par rapport à la terre et par rapport à la rose, qui, grâce à sa suspension à la Cardan, reste dans un plan horizontal. La déviation du compas va donc changer.

Si on veut simplement se rendre compte d'une façon générale de ce qui se passe alors, on peut y arriver aisément sans aucune formule.

Prenons le cas d'un bâtiment construit cap au Nord dans l'hémisphère Nord, et supposons le compas étalon placé comme d'ordinaire sur le pont supérieur, plus près de l'arrière que de l'avant.

Dans ce cas, le magnétisme sous-permanent du navire est tel que les hauts du navire qui avoisinent le compas ont en général une polarité boréale ou bleue.

Si le navire s'incline, la symétrie du fer doux du navire par rapport au plan vertical qui passe par le centre de la rose est détruite; les hauts du bâtiment qui se trouvent du côté du vent prennent une importance prépondérante et attirent l'extrémité Nord de l'aiguille, qui est un pôle austral ou rouge.

De plus, le fer doux transversal, primitivement horizontal, prend, en subissant l'action inductrice de la terre, un pôle boréal ou bleu à sa partie supérieure. Enfin, le fer doux vertical, dont le pôle bleu est à la partie supérieure, va agir à son tour sur le compas, mais d'une façon différente, suivant qu'il sera placé dans une des positions indiquées par les *fig.* 9 et 9 *bis*, pl. I.

En général, pour un navire construit en France ou en Angleterre, avec les conditions de cap et d'emplacement de compas que nous avons indiquées, l'extrémité Nord de l'aiguille du compas est attirée du côté du vent quand le bâtiment s'incline.

Si toutes nos hypothèses restent les mêmes, sauf celle relative au cap de construction, et que nous supposions que ce dernier soit le Sud, les hauts du bâtiment avoisinant le compas auraient, au contraire, une polarité australe ou rouge, et par suite le sens de la déviation perturbatrice due à la bande pourra changer.

Pour un navire construit dans l'hémisphère Sud, toutes les polarités que nous avons indiquées plus haut changent de nom, et par suite l'erreur sur le compas change de signe.

A chacun des cas particuliers relatifs à l'hémisphère et au cap de construction, à la place du compas étalon, à l'endroit occupé par le navire à la surface du globe, correspondent des recommandations pratiques destinées à assurer la route, quand les observations ne peuvent se faire pendant longtemps.

Nous allons formuler celle de ces règles qui s'applique au premier des cas examinés plus haut, celui où nous avons affaire à un navire construit cap au Nord dans l'hémisphère Nord, sur lequel on a été obligé, par temps brumeux, de garder longtemps les mêmes amures avec la route au Nord.

L'extrémité Nord de l'aiguille étant attirée vers le côté du vent, la première détermination astronomique du point montrera qu'on est au vent de la position que donne l'estime.

Si on avait, sur le même navire, gardé dans les mêmes circonstances la route au Sud, on se trouverait au contraire sous le vent de la position donnée par l'estime.

Par conséquent, si le temps est brumeux et qu'on veuille, malgré la bande, garder le cap qu'on aurait avec le navire droit, il faudra laisser porter de quelques degrés quand on court sur une route Nord, et au contraire lofer un peu quand on fait une route Sud.

Mais on ne peut déterminer le sens et la grandeur de la correction que l'on doit faire, qu'après avoir bien étudié son compas pour savoir dans quel cas particulier on se trouve. Le marin devra donc saisir la première occasion de faire les observations qui lui permettront de s'éclairer sur ce point.

Valeur que prennent les différents paramètres ou coefficients quand le navire donne de la bande. — Ce qui précède suffit à l'intelligence générale du phénomène ; mais, si nous voulons l'analyser en toute rigueur, il faut suivre la méthode qui, tout à l'heure, nous a donné l'expression de la tangente de la déviation au moyen des composantes vers le Nord et l'Est magnétiques, de la force magnétique qui, à bord, agit dans le plan horizontal de la rose.

Mais, avant tout, il faut bien fixer ce que nous entendons par erreur due à la bande. Il semblerait naturel d'appeler ainsi la différence entre les déviations observées à un même cap vrai du bâtiment, suivant que ce dernier est droit ou incliné sur un bord ou sur l'autre.

Ce n'est cependant pas ainsi que ce terme est généralement usité. Dans ce qui suit, nous désignerons par cette expression la différence qui existe entre les déviations observées à un même cap au compas, suivant que le navire est droit ou incliné.

Supposons donc que le navire s'incline d'un angle i sur tribord, et, pour plus de simplicité, admettons que le mouvement du navire soit une simple rotation autour d'une droite horizontale, parallèle à la quille et passant par le centre de la rose[1].

Dans ce cas l'aimant P ne change pas de position, par rapport à la rose, et, par suite, les termes qui le contiennent dans tang δ ne changent pas.

Quant à la force Q exercée, quand il est horizontal, par l'aimant transversal dirigé vers tribord, elle doit être remplacée par ses deux composantes, l'une horizontale et égale à $Q \cos i$, l'autre verticale, égale à $Q \sin i$, qu'on peut supposer exercées chacune par un aimant, l'un horizontal, l'autre vertical.

De même la force R, exercée tout à l'heure par un aimant vertical dirigé vers la quille, doit, quand le bâtiment s'incline d'un angle i, être remplacée par ses deux composantes, l'une horizontale égale à $-R \sin i$; l'autre verticale égale à $R \cos i$, et on peut supposer que ces deux forces émanent de deux aimants, l'un horizontal, l'autre vertical.

Par suite, dans les formules qui conviennent au bâtiment droit sur sa quille, Q devra être remplacé par $Q \cos i - R \sin i$, et R par $R \cos i + Q \sin i$.

Examinons maintenant ce que deviennent les actions des neuf tiges de fer doux de la planche I précédemment choisies (v. p. 56) dans ce mouvement du navire ; appelons a_1, etc., jusqu'à k_i les para-

1. On compte i, positivement, quand la bande est donnée sur tribord, négativement quand elle est donnée sur bâbord.

mètres nouveaux dus aux neuf tiges a, b, .. k. Quand le navire s'incline, la tige a ne change de position ni par rapport à la terre, ni par rapport à la rose; par conséquent nous aurons :

$$a_i = a.$$

La tige b (*fig.* 4), fait un angle i avec l'horizon, et, au lieu d'être soumise à la seule composante terrestre X, elle est soumise maintenant à la composante terrestre dont la direction coïncide avec la sienne, et cette composante est évidemment: $\mathrm{Y}\cos i + \mathrm{Z}\sin i$.

Le terme $b\mathrm{Y}$ sera donc remplacé par le terme $b(\mathrm{Y}\cos i + \mathrm{Z}\sin i)$.

Le premier terme $b\,\mathrm{Y}\cos i$ appartient évidemment au nouveau coefficient b c'est-à-dire au paramètre qui provient du fer doux horizontal et transversal, aimanté sous l'influence de la composante terrestre Y.

Le second terme $b\,\mathrm{Z}\sin i$ appartiendra au nouveau coefficient c_i c'est-à-dire au paramètre qui provient du fer doux vertical dans la position inclinée du bâtiment, fer doux qui par suite est aimanté par l'influence de la composante terrestre Z.

En somme, la tige b donne dans b_i un terme égal à $b\cos i$ et dans c_i un terme égal à $b\sin i$.

Le même raisonnement montrerait que la tige c_i de la *fig.* 7, planche I, donne, quand le bâtiment s'incline, dans b_i un terme égal à $-c\sin i$ et dans c_i un terme égal à $-c\cos i$.

Aucune autre tige ne donne d'autres termes dans les coefficients b_i et c_i, nous aurons donc :

$$(18)\qquad \begin{cases} b_i = b\cos i - c\sin i \\ c_i = b\sin i + c\cos i. \end{cases}$$

Un raisonnement analogue montrerait que les coefficients d_i et g_i ont pour valeur :

$$(18)\qquad \begin{cases} d_i = d\cos i - g\sin i; \\ g_i = g\cos i + d\sin i. \end{cases}$$

si les tiges d et g occupent les positions représentées dans les *fig.* 2 et 3 de la planche I.

Jusqu'à présent, nous ne nous sommes occupés que des coefficients dus aux tiges de fer doux dont les directions ou tout au moins les pôles coïncident avec l'axe de rotation du navire, je veux dire la parallèle à la quille menée par le centre de la rose.

Pour obtenir les quatre autres paramètres, il n'y a pas, à proprement parler, de difficulté nouvelle; mais, comme les expressions sont plus compliquées, il faut apporter un peu plus d'attention.

Nous allons exposer en détail ce qui concerne la tige e de la *fig.* 5, planche I.

Cette tige e était soumise tout à l'heure à la seule force Y et donnait naissance à une force magnétique e Y.

Quand le navire s'incline de i, la valeur de la composante terrestre dirigée suivant la nouvelle position de la tige e est évidemment $Y\cos i + Z\sin i$, et elle donne naissance suivant cette direction à une force magnétique $e(Y\cos i + Z\sin i)$. Pour rester fidèle à notre système de représentation des forces magnétiques par des tiges de fer doux dont les directions ou au moins les pôles coïncident avec les directions des axes ox, oy, oz, déjà définis, il faut décomposer cette force oblique au plan de la rose en deux autres : l'une, horizontale, qui aura pour expression : $e(Y\cos i + Z\sin i)\cos i$; l'autre, verticale, $e(Y\cos i + Z\sin i)\sin i$.

Examinons la composante horizontale; son expression se compose de deux termes, dont le premier contient en facteur la composante terrestre Y et le second la composante Z. On peut donc regarder le premier comme provenant d'une tige de fer doux transversal et horizontal $e\cos^2 i$ soumise à l'induction de Y; et le second comme provenant d'une tige de fer doux vertical placée dans une position analogue à f et représentée par l'expression $e\sin i\cos i$. Somme toute cette composante horizontale nous donne dans e_i un terme $+e\cos^2 i$ et dans f_i un terme $+e\sin i\cos i$.

On verrait de même que la composante verticale donne dans h un terme $e\cos i\sin i$ et dans k un terme $e\sin^2 i$.

En appliquant un raisonnement analogue aux tiges f, h, k, et en réunissant ensemble les termes que chacune d'elles donne dans un même paramètre, on aura en remplaçant $\cos^2 i$ par $(1-\sin^2 i)$:

$$(18)\qquad \left\{\begin{aligned} e_i &= e-(f+h)\cos i\sin i-(e-k)\sin^2 i;\\ f_i &= f+(e-k)\cos i\sin i-(f+h)\sin^2 i;\\ h_i &= h+(e-k)\cos i\sin i-(f+h)\sin^2 i;\\ k_i &= k+(f+h)\sin i\cos i+(e-k)\sin^2 i.\end{aligned}\right.$$

Nous déduirons les nouvelles valeurs des coefficients $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$, de la valeur des nouveaux paramètres au moyen de formules toutes semblables aux formules (5), c'est-à-dire que nous aurons :

$$(19)\qquad \lambda_i = 1 + \frac{a_i + e_i}{2}$$

et ainsi de suite.

Simplification due à la symétrie ordinaire du fer doux. — Ordinairement le fer doux du navire est symétrique par rapport au plan longitudinal quand le navire est droit sur sa quille, il en résulte que l'on doit faire dans toutes les formules précédentes :

$$b = d = f = h = 0.$$

Simplification due à la petitesse de l'angle i. — L'angle i est un angle de bande et non de roulis ; il dépasse donc rarement 15 degrés, et, si on l'exprime en parties du rayon, sa valeur est toujours inférieure à $\frac{15}{57,3} = 0,26$. On peut donc remplacer $\sin i$ par i, $\cos i$ par 1 et négliger $\sin^2 i$.

En faisant toutes les simplications précédentes, on aura :

$$(20)\quad \left\{\begin{array}{ll} \lambda_i = \lambda\,; & \mathfrak{A}_i = +\dfrac{c-g}{2\lambda}\, i\,; \\ \mathfrak{D}_i = \mathfrak{D}; & \mathfrak{E}_i = -\dfrac{c+g}{2\lambda}\, i\,; \\ \mathfrak{B}_i = \mathfrak{B}\,; & \text{enfin, } \mathfrak{C}_i = \mathfrak{C} + \dfrac{1}{\lambda}\left(e - k - \dfrac{R}{Z}\right)\operatorname{tang}\theta\, i. \end{array}\right.$$

L'expression de la tangente de la nouvelle déviation δ_i au moyen des nouveaux coefficients est évidemment identique à l'expression de la tangente de cette déviation au moyen des anciens coefficients quand le navire était droit : nous aurons donc finalement :

$$(21)\qquad \delta_i = \delta + \frac{c-g}{2\lambda}\, i + \mathrm{J}\, i\cos\zeta' - \frac{c+g}{2\lambda}\, i\cos 2\zeta',$$

en posant :

$$(22)\qquad \mathrm{J} = \frac{1}{\lambda}\left(e - k - \frac{R}{Z}\right)\operatorname{tang}\theta.$$

En remplaçant dans la formule (21) $\cos 2\zeta'$ par $\cos^2\zeta' - \sin^2\zeta'$, en multipliant le second terme du second membre par $\cos^2\zeta' + \sin^2\zeta'$, enfin en remplaçant e par sa valeur, en fonction de λ et de $\mathfrak{D}$ déduite des formules (5), soit $\lambda(1 - \mathfrak{D}) - 1$; enfin en posant :

$$(23)\qquad 1 + k + \frac{R}{Z} = \mu,$$

on aura :

$$(24)\qquad \delta_i = \delta + \mathrm{J}\, i\cos\zeta' + \frac{c}{\lambda}\, i\sin^2\zeta' - \frac{g}{\lambda}\, i\cos^2\zeta',$$

e :

$$(25)\qquad \mathrm{J} = -\left(\mathfrak{D} + \frac{\mu}{\lambda} - 1\right)\operatorname{tang}\theta,$$

expressions qui nous serviront dans l'exposition des règles de la compensation.

Influence du roulis sur la déviation. — Le roulis, lui aussi, exerce sur le compas une influence perturbatrice dont nous pouvons aisément nous rendre compte maintenant.

En faisant varier l'inclinaison du navire, en la faisant passer d'un côté à l'autre de la verticale, il met en jeu une force alternativement grande ou petite, et qui peut même agir alternativement à tribord puis à bâbord, si le navire roule des deux côtés de la verticale. Cette force alternative, éminemment variable, tend à imprimer à la rose des oscillations d'inégale amplitude et d'inégale durée, fort gênantes pour l'observation de la rose et du cap du bâtiment.

Erreur dynamique due au roulis. — Mais là ne se borne pas l'action du roulis. Le pivot de la rose entraîné par le navire prend dans l'espace un mouvement compliqué qui tend à se communiquer à la rose, et qui par conséquent trouble celui qu'elle prendrait sous l'action des seules forces magnétiques.

On appelle erreur dynamique, due au roulis, cette partie spéciale de l'erreur causée par ce dernier. Pour nous rendre compte de cette erreur dynamique, prenons une aiguille d'acier non aimantée et sus-

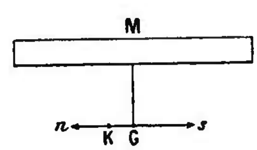


Fig. 20.

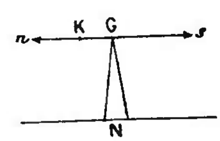


Fig. 20 *bis*.

pendons-la à un fil (*fig.* 20), ou mettons-la sur un pivot vertical (*fig.* 20 *bis*), qui passe par son centre de gravité G. Cette aiguille restera horizontale.

Mais, si on l'aimante, elle tendra à se placer parallèlement à l'aiguille d'inclinaison, et, pour la maintenir horizontale, nous devrons soit placer un petit poids additionnel du côté de l'extrémité Sud, soit, ce qui revient au même, reporter le fil ou le pivot de suspension vers l'extrémité Nord, en K par exemple. Donnons maintenant aux supports M ou N un mouvement alternatif dans le plan Est-Ouest magnétique, il est aisé de voir que, par rapport au point K, le centre de gravité G sera en avance ou en retard suivant que le mouvement de K est retardé ou accéléré. Par suite l'aiguille prendra un mouvement d'oscillation. C'est ce qui arrive quand le navire courant N ou

S magnétique, le pivot décrit, par suite des mouvements de roulis de navire, le plan Est-Ouest magnétique.

Nous avons raisonné dans l'hypothèse d'une route Nord-Sud, mais il est évident que tout mouvement du bâtiment produit une erreur dynamique, qui sera d'autant plus considérable et plus à craindre que le mouvement qui le produit sera plus accentué et de plus longue durée. — On comprend ainsi que le tangage et le roulis, et ce dernier surtout, aient une importance exceptionnelle dans le sujet qui nous occupe. En ne considérant que l'erreur dynamique due au roulis, la seule dangereuse dans la pratique, on comprend qu'elle varie avec la position que le compas occupe par rapport à l'axe idéal autour duquel roule le bâtiment; elle est, toutes choses égales d'ailleurs, d'autant plus considérable que le compas est plus éloigné de cet axe. C'est pour cela que les compas placés dans les steamers au sommet de mâtereaux spéciaux, de façon à être à grande distance de toute masse considérable de fer, ne donnent pas une bonne solution de la question du compas au point de vue qui nous occupe. En effet, outre que l'observation et l'usage du compas sont incommodes dans une position semblable, il n'est pas rare, par des roulis même modérés du navire, de voir le plan de la rose s'écarter de 20 à 25 degrés de chaque côté de la position qu'il devrait occuper.

CHAPITRE VI

CONCLUSION. — APPLICATIONS DES NOTIONS PRÉCÉDENTES DU MOUVEMENT DE LA ROSE D'UN COMPAS

1er Cas. — Mouvement d'une rose de compas autour de son pivot vertical, à terre, quand elle est écartée de sa position d'équilibre et soumise à la seule force magnétique terrestre. — C'est un cas particulier du problème de la rotation d'un corps autour d'un axe fixe que nous avons déjà étudié.

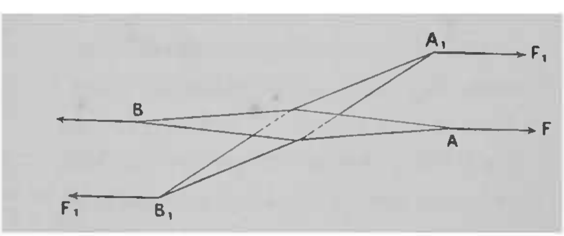


Fig. 21.

Supposons la rose immobile : dans ce cas la direction de l'aiguille aimantée coïncide avec celle des composantes du couple terrestre horizontal, AF et BF (*fig.* 21).

Si on déplace l'aiguille aimantée d'un angle α, le couple de ces deux forces tendra à ramener l'aiguille à sa position d'équilibre par une série d'oscillations de grandeur décroissante; nous avons trouvé pour l'équation de ce mouvement :

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2}=\frac{N}{\Sigma m r^2}.$$

Or les seules forces extérieures qui déterminent la rotation de l'aiguille sont ici les composantes magnétiques terrestres. On peut décomposer chacune d'elles en deux autres composantes, l'une dirigée suivant la longueur de l'aiguille qui a évidemment un moment nul, et l'autre perpendiculaire à cette aiguille. Cette dernière force est la seule que nous ayons à considérer. Si nous appelons H la grandeur de la force magnétique terrestre, la grandeur de cette dernière composante perpendiculaire à l'aiguille est dans le cas présent $H \sin \alpha$, et son moment par rapport à l'axe vertical passant à O est $H \sin \alpha \times l$, si nous appelons l la demi-longueur de l'aiguille. Mais, d'après ce que nous verrons plus loin, la grandeur de la force A F, qui agit sur l'aiguille, ne dépend pas seulement de la force magnétique due à l'aimant terrestre, mais aussi de l'intensité magnétique propre à l'aiguille considérée : supposons que cette intensité magnétique soit concentrée au pôle de l'aiguille, et désignons-la par m; supposons de plus que ce pôle coïncide avec l'extrémité de l'aiguille : la force A F est proportionnelle à m, elle est donc égale à m H, et par suite son moment, quand elle occupe la position $A_1 F_1$ est $m\, l\, H \sin \alpha$, et l'équation du mouvement devient ainsi :

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2}=\frac{2 m l H \sin\alpha}{\Sigma m r^2}=\frac{2 m l H \sin\alpha}{I}, \tag{26}$$

en appelant I le moment d'inertie de l'aiguille aimantée.

Moment magnétique d'une aiguille. (*V. notes*). — Cette quantité $2ml$ s'appelle le moment magnétique de l'aiguille aimantée considérée. Nous appellerons $2mlH$ le moment magnétique directeur et, pour abréger, le moment directeur.

La formule (26) est semblable à celle que l'on obtient quand on étudie le mouvement d'un solide, mobile autour d'un axe horizontal, écarté de sa position d'équilibre et libre d'osciller sous la seule action de la pesanteur. On sait, d'ailleurs, que le mouvement d'un tel corps (appelé pendule composé) est identique avec celui d'un pendule simple de longueur convenablement choisie. Un pendule simple est le pendule idéal formé par un point matériel pesant, suspendu à l'extrémité d'un fil inextensible et sans masse, dont l'autre extrémité est attachée en un point fixe.

Soit O D un tel pendule : si on l'écarte d'un angle α de sa position d'équilibre, l'équation du mouvement est donnée par une formule semblable à la formule (26), mais où le moment de la force magnétique est remplacé par le moment du poids du point matériel D.

Quand l'angle α est assez petit pour qu'on puisse le confondre avec son sinus sans erreur sensible, l'intégration de l'équation A donne pour le temps t mis par le pendule à faire une oscillation, c'est-à-dire à aller de O D, à la position symétrique :

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}.$$

Dans le cas de l'aiguille aimantée oscillant sous l'action de la force magnétique, nous aurons :

$$t = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{2\mathrm{H}ml}}. \tag{27}$$

Ainsi le temps d'une oscillation est proportionnel à la racine carrée du moment d'inertie et inversement proportionnel à la racine carrée du moment directeur; ce qui veut dire que, si l'aiguille aimantée est écartée à terre de sa position d'équilibre par une cause quelconque, elle y reviendra sous l'action de la force terrestre, avec une rapidité d'autant plus grande que le moment directeur de l'aiguille est plus considérable.

2° Cas. Mouvement de la rose à bord d'un navire où la déviation est nulle, c'est-à-dire sous l'influence de la force magnétique terrestre et des mouvements communiqués au navire par la mer. — Il est évident qu'il faut mettre une rose de compas dans des conditions telles qu'elle revienne rapidement à sa position d'équilibre, si elle en est écartée par une cause quelconque.

Pour cela nous devrons d'abord faire en sorte que, si le plan de la rose a cessé d'être horizontal, il puisse reprendre cette horizontalité, et il suffit pour cela d'abaisser le centre de gravité de la rose au-dessous du point de suspension, c'est-à-dire de placer ce dernier en O, au-dessus de la rose, au moyen d'une chape.

Le problème du mouvement de la rose sous l'influence des actions multiples et irrégulières qui lui sont transmises par le navire est beaucoup trop complexe pour pouvoir être abordé et résolu exactement par l'analyse. Nous devrons nous borner surtout ici à présenter une esquisse de ce problème dans un cas beaucoup plus simple que celui de la pratique, et nous étudierons seulement le mouvement de la rose autour de trois axes de coordonnées $o\,x$, $o\,y$, $o\,z$, de directions invariables, par rapport à la rose, passant par son point de suspension et emportés par lui dans son mouvement complexe.

Le mouvement du corps, si compliqué qu'il soit, peut être décomposé en une translation et une rotation. Cette rotation peut être décomposée à son tour en trois rotations élémentaires autour des axes $o\,x$, $o\,y$, $o\,z$; soient p, q, r, les vitesses angulaires de ces trois rotations composantes.

Si on appelle L, M, N, les moments des forces extérieures qui agissent sur la rose par rapport aux axes $o\,x$, $o\,y$, $o\,z$, et A, B, C, les moments d'inertie de la rose autour de $o\,x$, $o\,y$, $o\,z$, que nous supposerons être les axes principaux de l'ellipsoïde d'inertie correspondant au point O, le mouvement de la rose sera déterminé par les équations :

$$(28)[1] \qquad \left\{ \begin{aligned} A\frac{dp}{dt} &= (B - C)\,qr + L \\ B\frac{dq}{dt} &= (C - A)\,rp + M \\ C\frac{dr}{dt} &= (A - B)\,pq + N. \end{aligned} \right.$$

Or les forces qui viennent troubler l'action de la force magnétique terrestre sont évidemment les forces d'inertie qui correspondent aux différents mouvements que prend la rose sous l'influence du navire; on comprend donc que, dans les expressions qui donnent les composantes de l'accélération angulaires, il y ait intérêt à annuler tout ce qui dépend des forces d'inertie, c'est-à-dire à faire :

$$A - B = 0\,; \quad B - C = 0\,; \quad C - A = 0, \text{ ou } A = B = C.$$

Compas à aiguilles multiples. — Le calcul montre que pour avoir $A = B$ il faut, soit remplacer l'aiguille unique par un nombre pair d'aiguilles aimantées semblables et de même poids, parallèles entre elles, placées symétriquement de chaque côté du diamètre de la rose qui leur est parallèle et à 30 degrés chacune de ce diamètre, si leur nombre est égal à deux, soit employer les aimants circulaires.

Si les roses ont quatre aiguilles, un calcul analogue montre qu'il

1. *Cours de mécanique* de Poisson.

faut placer les deux aiguilles les plus voisines du centre à 15 degrés de part et d'autre du diamètre parallèle et les deux aiguilles les plus éloignées à 45 degrés de ce même diamètre, c'est-à-dire à 30 degrés de l'aiguille voisine.

Par une heureuse coïncidence, il se trouve que cette disposition des aiguilles, favorable à la stabilité dynamique de la rose, est aussi précisément celle qui annule les erreurs sextantales et octantales provenant d'une longueur trop considérable des aiguilles aimantées.

Quant à l'équation $A = C$, les expressions algébriques de ces deux moments d'inertie montrent qu'elle ne peut avoir lieu si le point de suspension coïncide avec le centre de gravité de la rose, et qu'il faut pour y satisfaire que ce dernier soit un peu au-dessous du centre de suspension, à une distance que le calcul détermine.

Nous avons déjà trouvé tout à l'heure que le point de suspension devrait être ainsi placé, afin que la rose eût tendance à se replacer rapidement dans le plan horizontal, si elle en était éloignée par une cause quelconque.

Nous renverrons ceux des lecteurs qui désireraient des détails plus complets sur l'étude analytique des mouvements d'une rose à une brochure publiée en 1878, par M. C.-E. Caspari, Ingénieur-Hydrographe de la Marine, et intitulée *Considérations sur les Compas et Boussoles*.

Poids et moment d'inertie du compas. — Ayant annulé dans les seconds membres des équations (28) tout ce qui dépend des moments d'inertie, en faisant $A = B = C$; ces mêmes équations nous montrent que, pour rendre les accélérations angulaires les plus petites possible, il y a avantage à rendre le moment d'inertie unique le plus grand possible, puisqu'il est le dénominateur des valeurs de $\frac{dp}{dt}, \frac{dq}{dt}, \frac{dr}{dt}$.

Or, si nous prenons l'expression $\Sigma\, m\, r^2$ du moment d'inertie d'un solide par rapport à un axe, nous voyons que nous pouvons augmenter cette quantité de deux manières: soit en augmentant m, et pour cela il faut augmenter le poids p de la rose; soit en augmentant r, c'est-à-dire en distribuant un même poids donné de façon que les poids élémentaires qui le constituent soient le plus loin possible de l'axe de suspension.

Il n'est pas indifférent d'employer l'un ou l'autre de ces procédés.

En effet, la force qui s'oppose à l'orientation de la rose par l'action magnétique terrestre, c'est le frottement de la chape de la rose sur son pivot.

Or ce frottement est proportionnel au poids total de la rose. Comme la force directrice du compas varie d'abord avec la composante horizontale terrestre quand le bâtiment se déplace, puis avec le cap du navire, on conçoit qu'il ne faille pas augmenter le poids outre mesure, de peur que le frottement, ayant pris une valeur trop considérable par rapport à la force directrice, n'empêche la rose d'obéir à cette dernière et n'altère la sensibilité du compas.

De plus, outre cette raison directe de ne pas augmenter le poids, il en est une autre qui tient à la nature même du frottement. On sait, en effet, que cette résistance au mouvement est loin d'avoir une valeur constante, qu'elle varie au contraire dans des limites assez étendues, puisqu'elle dépend non pas seulement du poids, mais encore de la nature, de l'état physique, de l'étendue des surfaces en contact.

En augmentant la valeur absolue du frottement, il est clair qu'on favorise l'amplitude des variations de cette résistance capricieuse dont l'irrégularité affecte d'une façon si nuisible les indications du compas.

Il sera donc préférable d'augmenter le moment d'inertie, en rejetant, par des artifices convenables de construction, le poids des matériaux employés le plus loin possible du centre.

Ce n'est que depuis peu d'années qu'on a, grâce à la théorie, des idées nettes à ce sujet. La pratique ayant montré que les roses à grand diamètre se comportaient mieux que les autres quand la mer imprimait au navire des mouvements d'amplitude considérable, on fut conduit à attribuer cet avantage à leur poids seul ; aussi s'efforça-t-on d'augmenter celui-ci de toutes les manières possibles, soit en augmentant de plus en plus leur diamètre, soit en leur ajoutant des poids parasites en cuivre faisant fonction de lest. Des constructeurs ou des marins aux prises avec les mouvements irréguliers de la rose ayant remarqué qu'ils étaient moindres quand le frottement entre la chape et le pivot augmentait, imaginèrent d'arriver à ce résultat en aplatissant plus ou moins légèrement la pointe du pivot. Quelques marins allèrent même jusqu'à mettre un peu de sable fin entre la rose et la chape. Nous n'insisterons pas sur le véritable danger que présentaient ces divers agissements. On remarqua vite d'ailleurs que ces roses à grand diamètre, même pourvues de pivots et chapes en bon état, étaient peu sensibles par beau temps, demandaient beaucoup de temps pour s'orienter et ne s'orientaient pas toujours de la même façon. On fut donc conduit à avoir dans toutes les marines deux sortes de roses, dites de beau ou de mauvais temps, et dont le nom lui-même indiquait le service particulier qu'on attendait de la rose.

Les compas liquides rendirent de meilleurs services; la poussée du liquide, qui faisait perdre à la rose un poids égal à celui du liquide qu'elle déplaçait, permettait de réduire autant qu'on le voulait le poids reposant sur le pivot. Le frottement était donc très faible en valeur absolue; et cette faible valeur absolue, en mettant la chape et le pivot dans d'excellentes conditions pour résister à l'usure, empêchait de plus les variations du frottement d'être gênantes dans la pratique. Malheureusement, la construction de ces compas, leur conservation en bon état à bord, paraissent plus difficiles à obtenir que celles des compas ordinaires, et c'est ce qui explique que leur usage ne se soit pas généralisé plus rapidement. Mais d'ailleurs les inventeurs ou les constructeurs de ce compas n'ont en général tenu compte que d'une partie des données du problème. Ils ont bien affaibli le poids de la rose, ce qui est nécessaire pour le frottement tout en augmentant le moment d'inertie, ce qui est excellent pour la stabilité dynamique; mais ils se sont arrêtés là.

Sir William Thomson a fait un pas de plus et nous semble avoir trouvé la solution du problème.

Période d'oscillation du compas. — Il a appliqué aux compas la méthode qui a permis de réduire si considérablement l'amplitude du roulis des navires; elle consiste, on le sait, à augmenter la période d'oscillation du roulis du navire dans une eau calme, de façon que cette durée soit notablement plus grande que celle de la période des houles que le navire est exposé à rencontrer. Les deux périodes ne pouvant pas être synchroniques, les mouvements ne prendront jamais une amplitude considérable.

Transportons cette méthode au compas, et proposons-nous d'empêcher que les roulis du navire communiquent des oscillations gênantes à la rose. Il faudra, d'après ce que nous venons de dire, que la durée d'oscillation propre à la rose, dérangée de sa position d'équilibre, soit notablement plus grande que la durée d'une oscillation de roulis. Or cette dernière peut aller jusqu'à 12, 14 et même parfois, mais rarement, jusqu'à 16 secondes. Par suite, tout compas dont la durée d'oscillation sera inférieure ou même égale à cet intervalle de temps, sera par ce seul fait dans des conditions défavorables de stabilité. Il sera au contraire dans des conditions d'autant meilleures (relativement au roulis), que cette durée sera plus considérable. Or, si nous nous reportons à la formule qui donne l'expression de la durée d'une oscillation :

$$(\beta) \qquad t = \pi \sqrt{\frac{\mathrm{I}}{2\,\mathrm{H}\,m\,l}}.$$

On voit que, pour éviter à un compas les inconvénients des roulis, nous sommes conduits à augmenter autant que possible la valeur de t, que nous devions au contraire chercher à diminuer pour obtenir une grande sensibilité. Or, t ne peut être accru qu'en augmentant I, ou en diminuant le moment magnétique. Il est mauvais de trop augmenter I, puisqu'on accroît ainsi le poids et par suite l'influence nuisible du frottement ; il nous reste donc à diminuer le moment magnétique de l'aiguille aimantée, et c'est ce que sir William Thomson a fait, en donnant à l'ensemble des aiguilles aimantées de ses roses un moment douze à treize fois plus faible que celui qu'ont les aiguilles ordinaires ; il est arrivé à donner ainsi à ses compas une période d'oscillation de 42 secondes, qui est double de celle qu'ont habituellement les compas du plus grand diamètre employé. Quant au poids total de la rose, il est environ quinze fois moindre que celui des roses ordinairement adoptées. On peut donc dire que jusqu'ici ce sont les roses imaginées par l'illustre savant anglais qui concilient de la plus heureuse façon les conditions multiples et parfois contradictoires auxquelles doivent satisfaire ces appareils.

Orientation d'une rose de compas à bord. — Le meilleur de tous les compas serait évidemment celui dont l'aiguille aimantée, sollicitée par une force magnétique constante en grandeur et en direction, indiquerait toujours la direction Nord-Sud magnétique, et y reviendrait *rapidement*, si pour une cause quelconque elle en était écartée.

Malheureusement on ne peut à bord réaliser un pareil idéal. L'adhérence de la chape et du pivot, si faible qu'elle soit, permet aux mouvements irréguliers que la mer imprime au navire de se communiquer à la rose et oblige, par conséquent, à allonger la durée d'oscillation de la rose.

De plus, l'aiguille à bord n'est pas soumise seulement à la force horizontale terrestre constante en grandeur et en direction, mais encore à une force déviatrice dont la grandeur et l'intensité varient avec le cap du bâtiment. Elle s'oriente donc suivant la direction, variable avec le cap, de cette résultante, et, quand on change de route, on n'a pas seulement à amener la ligne de foi d'une division à une autre de la rose restée fixe, mais il faut encore compter avec le mouvement propre que prend cette dernière sous l'influence des changements de la force directrice.

Les oscillations communiquées de ce fait à la rose sont d'autant plus considérables et gênantes pour l'observation que les variations de la force directrice, tant en grandeur qu'en direction, sont elles-mêmes plus considérables.

La rose ne prendra donc la position d'équilibre correspondant au nouveau cap, et le navire lui-même ne sera en route qu'après une série de tâtonnements que l'habileté du timonier pourra diminuer, mais qui dépendront aussi de la différence qui existe entre les déviations aux deux caps. On comprend donc qu'il soit nécessaire de réduire le plus possible la grandeur de la force perturbatrice, afin que les déviations aient une valeur aussi faible que possible. On obtient souvent un résultat satisfaisant et suffisant pour la pratique, en choisissant convenablement la place du compas; mais parfois cela ne suffit pas, et il n'existe pas d'autre remède que de compenser le compas [1]

Choix d'un compas. — En résumant tout ce qui précède, nous voyons qu'un compas, pour être bon, doit remplir les conditions suivantes :

1° Avoir un pivot très fin et très résistant, une chape très dure et très lisse, de façon que les surfaces en contact soient petites et qu'elles changent le moins possible d'état physique et d'étendue par l'usure.

1. C'est pour éteindre aussi vite que possible les oscillations de la rose, que celle-ci est ordinairement enfermée dans une boîte hémisphérique en cuivre. On met ainsi à profit la propriété bien connue qu'ont les corps non magnétiques et bon conducteurs de l'électricité de calmer les oscillations de l'aiguille aimantée tout en laissant constant le temps de l'oscillation. Ce sont les métaux qui ont à cet égard la plus grande influence, et parmi eux l'argent et le cuivre la possèdent à un haut degré. Le capitaine de vaisseau Évans, *Hydrographe royal* d'Angleterre, a prouvé ceci par l'expérience suivante. On a fait osciller une rose de l'amirauté dans une boîte de bois exactement semblable comme forme à la boîte de cuivre dans laquelle elle est enfermée d'ordinaire.

L'aiguille ayant été écartée de sa position d'équilibre d'un angle de 22 degrés, on a observé 134 oscillations faites dans une durée de 18 minutes avant que l'arc d'écart fût réduit à deux degrés.

La même aiguille, écartée du même angle dans sa boîte de cuivre, mit 4 minutes et fit trente oscillations seulement pour arriver au même angle d'écart de 2 degrés. (Évans, *Elementary Manual for the Deviation*, 4e édition, p. 3.)

Comme moyen pratique de reconnaître si un pivot a le degré de finesse nécessaire, on devra passer le doigt sur son extrémité et éprouver alors une sensation intermédiaire à celles que donnent la pointe d'une épingle et la pointe d'une aiguille;

2° Avoir son centre de gravité notablement au-dessous du point de suspension de la chape ;

3° Avoir des moments d'inertie égaux autour de la verticale du point de suspension et des diamètres horizontaux de la rose, ce qui exige, soit des aimants circulaires, soit des aiguilles multiples, qui ont d'ailleurs cet autre avantage, qu'à poids égal, la somme de leurs moments magnétiques est plus considérable que le moment magnétique d'une aiguille unique ;

4° Avoir un poids très faible, distribué excentriquement, disposition qui donne à la fois un frottement peu considérable et un moment d'inertie relativement grand ;

5° Avoir des aiguilles assez courtes pour que leur longueur puisse être négligée sans erreur sensible relativement à la distance qui les sépare des pièces de fer les plus voisines et des compensateurs (aimants ou fer doux). Cette faible longueur est une condition nécessaire et indispensable pour avoir des déviations régulières si on ne compense pas le compas, ou pour pouvoir le compenser exactement si les déviations sont trop grandes pour être acceptables ;

6° Avoir un moment magnétique faible et tel que la double oscillation du compas à terre, dans une position libre de fer, soit considérable, 30 secondes et mieux 40 et 42 secondes : en admettant, bien entendu, que les conditions précédentes soient déjà satisfaites, et que cette augmentation de la période d'oscillation ne soit pas due à un accroissement du moment d'inertie obtenu par une augmentation de poids de la rose. On a ainsi un double avantage, car, d'une part, le compas résiste mieux à l'influence du roulis et, d'autre part, il ne s'exerce pas entre les compensateurs et les aiguilles des compas d'influence réciproque capable d'empêcher la correction de la déviation quadrantale (*V. notes*).

Pivots et Chapes. — On ne saurait trop insister sur la nécessité de choisir avec le plus grand soin le pivot et la chape de la rose. Le pivot est, en général, en acier très dur; pour éviter l'action de la rouille on le dore légèrement, et même on préfère aujourd'hui les pivots en cuivre à pointe d'iridium. La chape doit être en agathe, rubis ou saphir. Dans tous les cas, pivots et chapes doivent être examinés fréquemment, avec la plus grande attention, et non seulement à l'œil nu mais encore à la loupe, de façon à bien s'assurer que leurs surfaces sont parfaitement polies et ne présentent aucune cavité, aspérité ou gerçure capable de gêner l'orientation de la rose. Il est superflu d'ajouter que cette visite devra être faite toutes les fois qu'on aura lieu de craindre des avaries dans ces deux pièces, par exemple après un tir au canon ou du mauvais temps.

Diamètre du compas. — En parlant plus haut de l'erreur dynamique due au roulis, nous avons dit la principale cause de la grande faveur accordée aux compas de grand diamètre, et insisté sur les désavantages réels que présentait leur poids considérable. Pour le compas étalon, une rose de 20 à 25 centimètres est largement suffisante : pour les compas de route, surtout si l'on veut que l'homme de barre gouverne au demi-degré près, il serait bon d'avoir des roses de plus grand diamètre. A bord du cuirassé anglais l'*Inflexible* on a installé, en août 1881, un compas de route de 40 centimètres de diamètre environ, dont on peut affirmer d'avance le bon fonctionnement, parce que sa rose du système de sir William Thomson pèse encore huit fois moins environ que les roses ordinaires d'un diamètre moindre d'un tiers, ce qui met le pivot dans d'excellentes conditions.

Erreur due au frottement. — Il faut toujours s'assurer avant le départ que l'erreur due au frottement est minime dans chaque compas, et, pour cela, il suffit d'écarter à diverses reprises, au moyen d'un aimant, l'aiguille de 30 à 40 degrés de sa position d'équilibre et de l'y laisser revenir par une série d'oscillations d'amplitude décroissante. L'erreur due au frottement sera d'autant plus faible que le plus grand écart angulaire observé entre ses différentes positions d'équilibre à terre et la ligne N.-S. magnétique sera plus petit.

A bord, où les forces directrices sont variables et peuvent être déterminées rapidement avec une approximation suffisante pour la pratique, il conviendra de faire cette observation quand le navire sera au cap où la force directrice est la plus petite.

La compensation des compas ayant pour effet d'égaliser à très peu de chose près la force directrice à tous les caps, il suffira, pour un compas compensé, si la valeur unique de la force directrice, moindre que celle de la force horizontale terrestre, en diffère de plus de un dixième, de faire cette observation à un cap quelconque.

Régulation et compensation. — Dorénavant, nous emploierons l'expression régulation du compas pour désigner l'ensemble des observations et des calculs que l'on est obligé de faire pour obtenir soit la table, soit la courbe des déviations d'un compas non compensé ou compensé approximativement, et nous réserverons celle de « compensation du compas » pour désigner l'opération qui consiste à placer près du compas des correcteurs aimantés et de fer doux pour annuler ou réduire à des valeurs très petites les déviations de la boussole.

CHAPITRE VII

Du bon fonctionnement des compas à bord. De la nécessité des observations de force horizontale. — Ordinairement, on se contente de présumer le plus ou moins bon fonctionnement des compas à bord, par la grandeur absolue des déviations, et on s'accorde à dire que, plus les déviations sont petites, et meilleures sont les conditions dans lesquelles le compas se trouve placé. A coup sûr, la petitesse des déviations est un facteur important de l'exactitude qu'on peut attendre des indications des compas, mais il n'est pas le seul, et quand on le prend comme moyen unique de contrôle, on commet une grave erreur qui explique les nombreux mécomptes que la paresse des compas de relèvements et surtout celle des compas de route fait éprouver aux capitaines.

On peut trouver, en effet, autour d'un compas, telle distribution de fer qui le rende extrêmement paresseux tout en ne lui laissant que de faibles déviations.

La compensation complète améliore, en général, cet état de choses quand il existe; mais elle ne lui apporte parfois qu'un palliatif insuffisant, et c'est ce qui explique le fait, dont on s'étonne à tort, encore aujourd'hui, d'un compas exactement et entièrement compensé, c'est-à-dire dont les déviations ne dépassent pas 2 à 3° et dont la paresse est néanmoins assez grande pour devenir gênante.

On rencontre encore fréquemment des officiers entièrement opposés à toute compensation des compas partielle ou totale et qui ne demandent qu'une table de déviations exactes. Nous verrons, dans la quatrième partie, les inconvénients relatifs aux compas non compensés même quand ils ne sont pas paresseux. Mais il n'est pas rare de les trouver tels, au moins dans une région déterminée de la rose, ce qui cause souvent de graves mécomptes de route, parce qu'on n'a pas fait les seules observations qui, en révélant ce défaut, permettent parfois d'y remédier par un contrôle plus fréquent et plus minutieux.

On ne peut avoir, sur le fonctionnement des compas à bord, des notions tout à fait exactes et complètes qu'en joignant à la connaissance des déviations, celle des différentes valeurs que prend, aux différents caps de la rose, le rapport de la force directrice du compas à bord, à un cap donné, à la force directrice de l'aiguille à terre dans un lieu libre de fer; en un mot, le rapport de la force que nous avons appelée H' (page 64) à H; nous désignerons ce rapport par m.

Pour obtenir sa valeur à un cap donné, il suffit, comme nous l'avons dit page 34, de faire osciller l'aiguille à bord, à ce cap, et de compter le temps T' d'un nombre d'oscillations donné, 10 par exemple. Si, à terre, dans un lieu libre de fer, l'aiguille met un temps T à faire ce même nombre d'oscillations, le rapport de H' à H, au cap indiqué, sera égal à celui de T^2 à T'^2.

Il suffit d'avoir la valeur de ce rapport pour les huit caps principaux de la rose.

A un cap donné, c'est la valeur de ce rapport qui est la vraie caractéristique de l'exactitude qu'on peut attendre des indications des compas. En général, les compas sont construits de telle sorte qu'ils sont suffisamment sensibles quand ce rapport a une valeur supérieure à 0,7; l'unité de force magnétique étant celle de la carte. Plus ce rapport est faible dans un endroit ou à un cap donné et plus il y a lieu de craindre la paresse du compas. Avec les huit valeurs trouvées, on trace, comme pour les déviations, une courbe continue donnant les valeurs du rapport indiqué pour tous les caps; puis on fait la somme des diverses valeurs observées, on la divise par le nombre même des observations, 8 dans le cas présent, et on a ainsi la valeur moyenne du rapport.

Ceci fait, le compas est dans des conditions d'autant meilleures :

1° Que cette valeur moyenne est plus grande;

2° Que la variation du rapport, de part et d'autre de cette valeur moyenne, est moins considérable, quand le cap parcourt toute la rose.

Avec le rapport de H' à H, il y a lieu de considérer encore ce rapport multiplié par le cosinus de la déviation correspondante au cap où on fait l'observation. La valeur moyenne de ces nouveaux rapports est, en effet, un nombre constant dans tous les lieux du globe, puisque c'est précisément λ, quantité qui ne dépend que des paramètres constants du fer doux horizontal (comme nous l'avons vu page 70) et représente la force directrice moyenne de l'aiguille vers le Nord magnétique.

Les observations de rapport de forces horizontales n'allongeraient pas d'ailleurs le temps consacré à la régulation car on pourrait faire chacune d'elles dans la dernière des quatre à cinq minutes d'attente qu'il convient de s'imposer à chaque cap, dans l'opération de la régulation, avant de prendre la valeur de la déviation, si on veut en avoir une valeur exacte.

On peut déterminer plus rapidement ce rapport avec un déflecteur comme nous l'avons déjà dit et comme nous le répéterons en détail dans la dernière partie. Nous n'en parlons pas ici parce qu'il faudrait un instrument nouveau et que nous voulons bien montrer qu'il suffit de ceux que l'on possède pour obtenir très aisément les données indispensables qu'on néglige de prendre aujourd'hui.

De la durée d'oscillation de la rose. — Les constructeurs, en livrant chaque rose devraient donner par écrit son poids, son moment d'inertie, et, surtout et avant tout, le temps d'un nombre déterminé d'oscillations de cette rose, en indiquant le lieu où ils ont fait l'observation et la grandeur de la force horizontale terrestre en ce lieu.

A leur tour, les officiers des montres devraient déterminer cette quantité de temps à autre et particulièrement avant chaque opération de régulation.

Si t est le temps de dix oscillations dans un lieu libre de fer où la force horizontale terrestre est H, le temps observé t' de dix oscillations, dans un autre lieu où la force horizontale est H', doit être égal à

$$t' = t\sqrt{\frac{H}{H'}}.$$

Quand on trouve entre les deux valeurs de t' l'une observée, l'autre calculée par cette dernière formule, une divergence trop considérable, il faut examiner avec soin le pivot et la chape, les changer s'il y a lieu. Enfin, si la différence persiste et indique une diminution du moment directeur en donnant pour t' une valeur trop grande, il y aura lieu de changer la rose elle-même.

En général, dans les roses construites avec soin, les aiguilles ne se désaimantent jamais sensiblement, et les divergences entre les deux valeurs observée et calculée de t' proviennent presque toujours de l'état du pivot et de la chape. La durée d'oscillation constitue donc un des plus sûrs moyens de contrôle de ces deux organes essentiels du compas, qui, toutes choses égales d'ailleurs, se comportent d'autant mieux que la rose est plus légère et peuvent donner à l'erreur de frottement, quand ils ne sont pas dans un état satisfaisant, une valeur de 2° et parfois même 3°

Des compas liquides. — Employés souvent avec succès quand les roses se mouvant dans l'air, et que nous appellerons dorénavant roses sèches, n'étaient pas assez stables, ils sont fréquemment aujourd'hui l'objet de préventions assez justifiées.

Les marins leur reprochent notamment :

1° La difficulté quand ce n'est pas l'impossibilité de visiter et de changer s'il y a lieu, la chape et le pivot.

2° La fréquence des avaries provenant des différences de températures, et des inégalités de dilatation qui donnent lieu sur les joints à des pressions parfois considérables et toujours nuisibles.

3° La difficulté et souvent l'impossibilité des réparations à bord.

Frappé de l'importance de ces inconvénients, j'ai cherché à les faire disparaître et, après de fréquents essais à la mer, je pense y avoir réussi. M. Carpentier, ancien élève de l'École polytechnique, qui possède et dirige aujourd'hui les ateliers de Ruhmkorff avec une habileté et une compétence reconnues, a réalisé, sur mes indications, un compas liquide où le pivot se visite et se change en quelques minutes; où les joints ne travaillant jamais que sous la pression atmosphérique ne sont sujets de ce fait à aucune avarie et peuvent d'ailleurs être refaits par les moyens mêmes du bord.

De la formule à cinq termes de la déviation. — L'utilité de cette formule est évidente. Comme elle est d'autant plus exacte que les déviations sont plus petites, on voit combien il est utile de placer le compas de façon que cette condition soit remplie.

Or tous les coefficients de cette formule sont formés au moyen des cinq coefficients exacts (voir 3e partie). Tous ceux-ci ayant pour dénominateur commun λ, on voit de suite qu'il faudra placer le compas de façon à avoir pour cette quantité la plus grande valeur possible.

Avantages de la compensation partielle. — D'un autre côté, les coefficients B et C de la déviation semi-circulaire ont souvent des valeurs assez notables dépassant 6 à 7 degrés par exemple. Dans ce cas, il y aura évidemment avantage à employer la compensation partielle, c'est-à-dire à placer près des compas des aimants compensateurs qui annulent ou à très peu près ces deux coefficients.

Cette compensation partielle a encore un autre avantage, elle réduit les oscillations de la force directrice autour de sa valeur moyenne.

En effet, toutes les pièces de fer qui produisent la déviation semi-circulaire, aimants permanents ou fer doux vertical, n'ont aucune influence sur la force directrice moyenne du compas car nous avons montré que ce qu'elles lui ajoutent à un cap donné, elles le lui retranchent exactement au cap diamétralement opposé.

Mais il est bien évident que ces différences, en plus et en moins de la valeur moyenne, sont d'autant plus nuisibles qu'elles sont plus considérables. Aux caps où elles diminuent notablement la force directrice du compas, elles peuvent rendre le compas paresseux.

Il est donc bon d'ajouter des aimants compensateurs, ils produisent des effets inverses à ceux des pièces de fer indiquées plus haut, c'est-à-dire qu'ils diminuent la force directrice au cap où elle était la plus grande, ce qui, en général, n'est pas un mal pour l'augmenter précisément de la même quantité au cap où elle était la plus faible, ce qui est presque toujours un bien, parce que pour la presque totalité des bâtiments et des compas la force directrice moyenne de l'aiguille à bord est presque toujours inférieure à ce qu'elle est à terre.

Ce qui précède montre combien est mal fondée l'objection capitale qu'on a faite pendant longtemps et qui s'oppose encore à l'adoption de la compensation partielle des compas. On lui reproche avant tout de rendre le compas paresseux, et on voit, au contraire, qu'elle a pour effet de remédier à cette paresse.

Quant aux reproches secondaires adressés à cette méthode, s'ils semblent plus fondés que le premier en apparence, il est aisé de voir qu'ils ne tiennent qu'à une application erronée ou mal conçue et qu'on peut aisément les faire disparaître.

Par exemple, on met parfois les aimants compensateurs trop près des aiguilles ; il en résulte des inconvénients que nous avons signalés, qui ne tiennent en rien à la méthode elle-même et disparaissent dès qu'on tient compte des prescriptions réglant la distance minima qui doit exister entre les aiguilles et les correcteurs.

Mais ce qui a masqué la plupart du temps l'avantage réel de la méthode, c'est l'habitude malheureuse qu'on a prise au port de départ, de fixer les compensateurs soit au pont, soit au billot en bois du compas, d'une façon qui rend leur déplacement difficile et très lent.

En général, d'ailleurs, les capitaines préfèrent ne pas changer la place de ces compensateurs dans tout le cours d'une campagne, croyant que cette opération est très délicate et très longue à faire, ce qui est une erreur. (V. Quatrième Partie.)

Cette position invariable des compensateurs pour corriger une erreur dont une partie seulement est constante, celle qui provient de P et Q, tandis que celle qui provient des termes où les paramètres constants du fer doux sont multipliés par la tangente de l'inclinaison est variable avec cette dernière quantité, donne lieu, dès que le bâtiment a changé de place, à la réapparition de la déviation semi-circulaire dans une mesure d'autant plus large que les paramètres c et f sont plus grands et les valeurs de $tang\ \theta$ plus différentes de sa valeur au port de départ.

On se mettra à l'abri de cet inconvénient en adoptant un dispositif quelconque permettant de déplacer aisément les compensateurs, de façon à suivre les variations des coefficients et à les annuler dans tous les lieux du globe, ce qu'on peut faire par des observations qui durent un quart d'heure environ, comme nous le verrons dans la quatrième partie. Lors bien même qu'on reculerait à tort devant cette amovibilité très peu coûteuse, on voit que la compensation partielle garderait, dans tous les cas, l'avantage de réduire, dans une certaine mesure, les oscillations de la force directrice autour de sa valeur moyenne. Si, au contraire, on consentait à munir les compas actuels d'aimants compensateurs facilement amovibles, on les mettrait dans des conditions de service beaucoup meilleures, permettant d'attendre avec de moindres inconvénients leur remplacement graduel, mais forcé, à notre avis, par les compas entièrement compensés.

M. le vice-amiral Peyron, alors ministre de la marine, a bien voulu m'autoriser à appliquer ces idées, et, sur mes indications, M. Carpentier a transformé d'une façon très simple un des compas de route du modèle le plus habituellement employé. Une modification semblable, mais encore moins encombrante, a été apportée à un compas de relèvement suspendu dans une boîte de cuivre ou de bois de petite dimension. Je suis convaincu que ces appareils seront employés avec fruit et comme une transition utile et nécessaire entre les compas anciens, sans aucun compensateur, et les compas complètement compensés.

Supériorité des compas entièrement compensés. — Ceux-ci, outre des aimants compensateurs mobiles, reçoivent encore des correcteurs de fer doux qui permettent de faire disparaître, — ou à très peu près, — le coefficient D, et même au prix d'une modification très simple le coefficient E, si celui-ci n'est pas négligeable comme cela arrive le plus souvent. De plus, dans un pareil compas, la force directrice est constante à tous les caps, à des quantités près négligeables dans la pratique ; il en résulte donc qu'une seule observation, soit d'oscillation, soit d'écart par le déflecteur, suffira pour donner la quantité λ, dont la grandeur indiquera si le compas est placé dans de bonnes conditions ou si on doit changer son emplacement pour éviter qu'il ne soit paresseux.

Des coefficients λ, A, E, D, B et C. — De λ. Son expression donnée page 70, ce que nous avons dit des avantages qu'on trouve à lui donner la plus grande valeur possible montre qu'il faut éviter avec soin de placer le compas trop près des pièces de fer donnant à a et e des valeurs négatives. Autrement dit, il ne faut pas le placer trop près de pièces de fer horizontales considérables, traversant d'un seul tenant et sans interruption d'un côté à l'autre du compas.

Au contraire, toute barre de fer horizontale située tout entière d'un même côté de la cuve du compas et que nous supposerons, pour fixer les idées, rencontrer l'axe vertical de ce dernier, cause bien une déviation quadrantale, mais augmente la force directrice moyenne. Elle n'a plus que ce dernier effet si on a soin de compenser la déviation quadrantale qu'elle produit par une barre toute semblable, placée à égale distance du centre du compas, mais sur une droite perpendiculaire passant également par le centre du compas.

Si donc on imagine, dans un plan parallèle à la rose, une sorte de caillebotis en fer doux, composé de rayons compris entre deux cercles concentriques en cuivre, ayant leur centre commun sur l'axe vertical du compas (le diamètre du plus petit étant d'ailleurs plus long que le diamètre de la cuve du compas) et tel que les rayons qui le forment soient deux à deux perpendiculaires et divisent de plus cette couronne annulaire en secteurs égaux, dont le nombre soit un multiple de quatre, on aura un système qui augmentera la force directrice, sans causer de déviation quadrantale.

Si on consulte les tableaux publiés en Angleterre par sir J. Evans et le captain E.-W. Creak, en Allemagne par le capitaine C. Koldenvey, et qui contiennent les valeurs des différents coefficients observés pour des compas diversement placés à bord de bâtiments de différents types, on trouve pour λ les résultats suivants: A bord des cuirassés et des bâtiments en fer λ est en général compris entre $0^m,950$ et $0^m,830$ pour les compas de relèvement. Sa valeur descend souvent à $0^m,800$ et arrive même parfois jusqu'à $0^m,640$ pour les compas de route.

A notre avis, il ne faut jamais accepter une valeur inférieure à 0,7 (l'unité de force magnétique étant celle de la carte) ou, quand on le fait, il est absolument nécessaire d'établir la courbe des valeurs du rapport H' sur H, pour les parages où l'on se trouve, afin de savoir dans quelles régions de la rose il y a lieu de craindre la paresse du compas.

La valeur de λ subit de faibles variations après le lancement du bâtiment, dans les circonstances les plus défavorables ces variations ne dépassent pas 0,04 par an; en général, elles sont de 1 ou 2 centièmes dans ce laps de temps.

On a remarqué que la chaleur des tropiques et des zones équatoriales semble accélérer ces variations de λ. Au bout de deux ou trois ans de lancement et de navigation, les déterminations successives de λ qu'il est bon de faire semestriellement dans cette période de changement, montrent que ce coefficient a pris une valeur constante, aux erreurs près d'observation. On n'a plus alors qu'à vérifier annuellement la constance de cette valeur quand les circonstances de température ou d'humidité dans lesquelles navigue le bâtiment ont varié brusquement et notablement.

Des coefficients constants A, E, D. — Comme λ, ces coefficients ne deviennent réellement constants que deux ou trois ans après le lancement et, en général, d'autant plus vite que le bâtiment a plus navigué.

Ils peuvent toujours, même durant les premiers temps, être considérés comme constants sans erreur appréciable pour la durée des traversées ordinaires, 20 ou 30 jours. Il convient de déterminer leurs valeurs semestriellement tant que le bâtiment n'a pas atteint son état magnétique stable. Quand plusieurs déterminations successives ont donné pour ces coefficients des valeurs constantes (aux erreurs près d'observation 20 à 30 minutes d'arc), on n'a plus qu'à prendre pour leur valeur véritable celle de la moyenne de ces observations, et qu'à les vérifier de temps à autre, comme λ, si les conditions climatériques dans lesquelles se trouve le bâtiment changeaient brusquement et notablement.

En général, A et E ont des valeurs inférieures à 1°30′ en valeur absolue pour les compas bien placés dont l'axe se trouve dans le plan médian longitudinal du navire.

Cette valeur de 1° 30′ représente aussi, à peu près, les variations dont sont susceptibles ces coefficients dans la durée totale des premières années qui suivent le lancement et cela dans les cas les plus défavorables.

Dans le cours d'une de ces années, les deux coefficients ne varient guère que de 20 à 30 minutes d'arc, c'est-à-dire de quantités comparables avec les erreurs ordinaires d'observation à bord.

Du coefficient constant D. — Comme les deux précédents coefficients, il n'atteint une valeur réellement constante que plusieurs années après le lancement; ses variations sont d'ailleurs peu considérables avec le temps et, même dans les premières années, il peut être regardé comme constant pendant la durée d'une traversée ordinaire. Pour beaucoup de compas de relèvements ou étalon bien placés, la valeur de ce coefficient est comprise entre + 2° et + 4°; quand elle dépasse 6° à 7°, il est préférable de corriger l'erreur quadrantale qu'il occasionne au moyen de correcteurs de fer doux, comme on l'indiquera dans la quatrième partie. On y gagne : 1° d'avoir des déviations plus petites, auxquelles la formule simplifiée s'applique plus exactement; 2° de diminuer la grandeur des oscillations de la force directrice autour de sa valeur moyenne; 3° d'augmenter en général cette valeur moyenne.

On a remarqué que la valeur de D dépend de la hauteur du compas au-dessus du pont et de la largeur du bâtiment à l'endroit où est placé le pilier. Les observations ne sont pas assez nombreuses pour qu'on puisse énoncer à cet égard des lois précises susceptibles d'une expression analytique.

Des coefficients B et C. — Ces deux coefficients sont variables, *dans un même lieu,* avec le temps dans les premières années qui suivent le lancement.

Plus tard, quand le bâtiment a atteint un état magnétique à peu près constant, ils ne varient plus dans un même lieu, à moins que le bâtiment ne garde pendant plusieurs jours un même cap dans le port. C'est pour cela qu'il est essentiel de ne commencer les opérations de régulation et de compensation qu'après avoir laissé le temps au bâtiment d'éviter en rade, à tous les caps, sous l'influence du vent ou de la marée, ou après lui avoir fait faire, en marche, plusieurs tours complets d'horizon en nombre pair, chacun d'eux en sens inverse du précédent.

Nous avons dit page 69 comment on séparait $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ en deux parties distinctes, qui, une fois déterminées, permettent de calculer à l'avance les valeurs que prendront ces coefficients dans une position géographique donnée, d'en déduire par les formules 56, p. 143, les valeurs de B et C qui, au moyen d'un tableau du type III, p. 163, permettront d'obtenir pour le lieu donné, et pour tous les caps de la rose, une table complète des déviations, sans avoir besoin de faire une seule observation de variation.

La pratique révèle cependant, dans certains cas où le navire a suivi pendant plusieurs jours une même route, des écarts de 1°, 2° et 3°, quelquefois même 4° entre les valeurs de la déviation observée directement ou déduites des valeurs de B et C, obtenues par le calcul. Nous dirons, à la fin de la troisième partie, à quoi tiennent les écarts et comment on arrive également à les prévoir, en faisant les observations avec plus de soin et en compliquant un peu les calculs. Ce que nous disons dans la première et la seconde partie suffit largement aux besoins de la pratique ordinaire. Plus ces coefficients sont grands et plus la compensation partielle est avantageuse.

Des compas de route. — Les compas de relèvements sont, en général, placés avec soin et dans de bonnes conditions, mais il n'en est pas toujours de même des compas de route qui, parfois, sont si paresseux qu'on ne peut s'en servir qu'à la condition de prendre des comparaisons fréquentes avec le compas étalon. On les mettrait, en général, dans des conditions beaucoup meilleures en les élevant plus qu'on ne le fait habituellement et en mettant ainsi les aiguilles aimantées de ceux de ces compas qui sont sur le pont à un mètre au moins au-dessus de ce dernier. Il faudrait avoir soin également de les éloigner le plus possible de la machine du servomoteur et de l'axe de la roue quand il est en fer.

CONCLUSION GÉNÉRALE

De la paresse des compas. — Il est indispensable si on veut être prévenu de la paresse possible du compas et pouvoir y remédier :

1° D'observer et de noter, pour chacun des compas du bord, le temps que met sa rose à faire, à terre, dans un lieu libre de fer, un nombre donné d'oscillations dans le port de départ en France. Soit H la valeur de la force horizontale terrestre dans ce lieu ;

2° De faire, à chaque régulation du compas, aux huit caps principaux de la rose, les observations d'oscillation ou d'écart qui permettent d'obtenir la courbe des valeurs du rapport de H' à H, H ayant la signification particulière du paragraphe précédent ;

3° De faire, à la mer, à chaque route nouvelle, toutes les fois que le temps et la mer le permettent, l'observation d'oscillation qui permet d'avoir, pour ce cap, le rapport de H' à H, cette dernière quantité ayant la signification qui lui a été donnée dans les deux paragraphes précédents. Plus ce rapport a une faible valeur et plus le compas risque d'être paresseux à cette route et plus, par conséquent, il faut le surveiller étroitement et multiplier toutes les observations qui permettent de contrôler la route ou les relèvements qu'il indique.

Quand on fait les observations de force en comptant les oscillations de la rose elle-même, écartée de sa position d'équilibre de 35 à 45 degrés, on n'obtient que des résultats grossièrement approchés. Il est préférable, quand on n'a pas de déflecteur à sa disposition, d'employer, spécialement pour ces observations, un instrument très simple et peu coûteux puisqu'il se compose seulement d'une aiguille aimantée et de son pivot. L'aiguille doit avoir la forme d'un losange très allongé de 7 à 8 centimètres de long, de 6 à 7 millimètres de largeur au fort, et juste assez d'épaisseur pour être parfaitement rigide. Sa chape et son pivot doivent être faits avec le plus grand soin. On vérifie qu'il en est ainsi en écartant l'aiguille, mise sur son pivot, de 40 à 45 degrés de sa position d'équilibre. Dans un lieu libre de fer et où la force horizontale terrestre est voisine de l'unité choisie dans notre carte, elle doit faire de 80 à 100 oscillations bien distinctes, avant de revenir au repos. Le pivot de l'aiguille doit pouvoir être mis à la place de celui de la cuve au moment où l'on va, pour faire les observations de force, remplacer la rose par l'aiguille isolée. Sitôt les observations faites, le pivot spécial doit être enlevé, en un mot il ne doit servir qu'à son aiguille.

Pour que les diverses valeurs du rapport de H′ à H, obtenues en différents lieux, soient toutes comparables entre elles et aux limites numériques que nous avons indiquées, il faut prendre pour H, comme nous l'avons répété plusieurs fois, la force choisie pour unité dans notre carte. Si donc, au départ de France, on a observé le temps T_1 de dix oscillations de la rose ou de l'aiguille isolée, dans un lieu où la force horizontale terrestre H_1 est différente de 1, on obtiendra facilement le temps T correspondant à dix oscillations sous l'influence de la force 1 par la formule $T^2 = T_1^2 H_1$.

Tout ce qui change la valeur de H′, force directrice qui oriente le compas à bord, modifie, nous l'avons vu, la sensibilité du compas pour indiquer les embardées et les changements de route et aussi sa stabilité par mauvais temps. C'est ce qui arrive dans un même lieu quand on change de cap, ou encore, à un même cap, quand le navire s'est déplacé sensiblement à la surface du globe. Car il ne faut pas oublier, en effet, que H′ n'est autre chose que la résultante des différentes forces horizontales magnétiques qui agissent sur l'aiguille du compas et qui proviennent, les premières des aimants permanents du navire, les secondes du fer doux et du magnétisme terrestre. Les premières peuvent être regardées comme constantes, mais les secondes dépendent essentiellement du lieu occupé par le navire. Il n'y a donc pas lieu de s'étonner quand un compas excellent sur les côtes de France perd un peu de sa sensibilité ou de sa stabilité dans d'autres régions.

Ces changements ne sauraient jamais être dangereux ni même très gênants quand le navire navigue dans des parages où la force horizontale terrestre est plus grande que la force choisie pour unité dans la carte; car, dans ce cas, la sensibilité devient plus grande et la stabilité diminue très peu. Cette dernière dépend, en effet, de la durée d'oscillation de la rose. Soit t cette durée en secondes quand la rose est soumise à une force horizontale 1, elle devient dans un lieu où la force horizontale est H′ $t \times \frac{1}{\sqrt{H'}}$: or, H′ ne dépasse jamais 2, 5 dans les parages ordinairement fréquentés, et dans ce cas limite le facteur qui multiplie t est 0,62 seulement, soit plus de six dixièmes, quantité d'autant plus insuffisante pour détruire la stabilité de la rose que celle-ci a, en France, une durée d'oscillation plus grande, puisque nous avons vu qu'une condition essentielle de la stabilité, c'est que la durée d'oscillation de la rose reste toujours notablement supérieure à celle du navire lui-même. Si, par impossible, le compas devenait trop peu stable, on pourrait y remédier de deux façons, soit en prenant une rose de même moment d'inertie, et d'un moment magnétique plus faible, soit en prenant une rose de même moment magnétique, mais d'un moment d'inertie un peu plus fort.

Il y a avantage à prendre la première solution dans l'intérêt de la parfaite conservation de la chape et du pivot qui exige que le poids de la rose soit le plus faible possible.

Quand, au contraire, le navire navigue dans des parages où la force horizontale terrestre est plus faible que 1, la stabilité devient plus grande, mais la sensibilité qui est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à la force directrice, diminue avec la force terrestre.

Et quand celle-ci devient inférieure à 0,7 ou, parfois même, égale à 0,5, la sensibilité peut être tout à fait insuffisante. Pour y remédier, il faut changer la rose et prendre soit une rose de même moment magnétique, mais d'un poids plus faible, soit une rose de moment magnétique plus grand et de même poids. Autrement dit, il faut ou changer le système magnétique de la rose, ou bien réduire ou même enlever son cercle d'inertie, de façon que le poids de la rose varie proportionnellement à la force horizontale terrestre, ou que son moment magnétique varie en raison inverse de cette même force. Les roses construites de telle manière qu'on puisse les modifier, comme nous l'avons dit dans les paragraphes précédents, doivent donc avoir la préférence sur toutes les autres. Nous croyons que deux roses de sir W. Thomson suffiraient pour tout le globe, en prenant pour l'une celle de 25 centimètres usitée habituellement et du poids de 13 grammes, et pour l'autre une rose identique comme système magnétique, mais dont on aurait réduit le poids à 6 ou 7 grammes, ce qui est possible.

Des déviations anormales. — Comme nous l'avons déjà dit, la formule simplifiée des déviations est d'autant plus exacte que les déviations sont plus petites, mais il ne faut pas perdre de vue que, même dans les cas favorables, l'accord entre l'observation et le calcul est d'autant plus grand que l'on a mis le compas plus loin de toute pièce de fer, un peu importante, surtout quand elle est mobile, comme un canon à pivot central, l'axe de la barre et son servo-moteur.

Enfin, on ne doit jamais oublier qu'il faut toujours s'attendre à un léger désaccord entre l'observation et la théorie, et d'autant plus grand que la condition précédente n'aura pas été observée, toutes les fois que le bâtiment aura gardé le même cap plus longtemps dans le port, en rade ou à la mer. D'une façon générale on peut dire :

1° Après avoir gouverné quelque temps sur des routes Ouest, attendez-vous, si vous tournez au Nord, à une erreur Ouest, et si vous tournez au Sud à une erreur Est.

2° Après avoir gouverné quelque temps sur des routes Est, attendez-vous, si vous tournez au Nord, à une erreur Est, et si vous tournez au Sud, à une erreur Ouest.

Ces erreurs peuvent atteindre trois à quatre degrés et parfois davantage; elles tiennent au retard de l'induction terrestre, à l'imparfaite douceur ou dureté du fer. On ne peut arriver à calculer à l'avance leurs valeurs numériques au degré près, qu'après des observations faites pour chaque bâtiment et chaque compas de ce bâtiment en particulier. Le nombre des observations nécessaires diminue beaucoup quand on calcule les valeurs de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, comme il est dit à la fin de la troisième partie.

Dans une conférence récente sur le *Magnétisme des Navires*, faite en 1886, par M. William Bottomley, à la Société des Arts de Londres, nous trouvons sur les précautions nécessaires qu'il faut prendre pour les compas quand on emploie l'éclairage électrique, des détails d'autant plus intéressants que ce mode d'éclairage tend aujourd'hui à se généraliser sur les navires de guerre et sur les paquebots des grandes lignes transatlantiques.

Quand on emploie une machine dynamo à courant continu et un seul conducteur, en se servant de la muraille même du navire pour fil de retour, on peut produire sur le compas une erreur d'autant plus considérable que le courant est plus fort et plus rapproché. Par exemple, le conducteur principal d'une dynamo, destinée à éclairer cent lampes, laisse passer environ cent ampères, et ce courant peut produire, sur un compas placé à neuf mètres, une déviation de 7°,5. Comme cette erreur se produit seulement pendant l'éclairage et que les observations qui permettent de régler et de compenser les compas ont lieu ordinairement le jour, on voit qu'il peut se passer un certain temps avant que le capitaine puisse être prévenu et se méfier d'une erreur aussi considérable et aussi dangereuse puisqu'elle n'affectera la route que pendant quelques heures de nuit. Il faudra donc, toutes les fois qu'on fait usage à bord d'une machine à courant continu, avoir soin de la munir de deux fils, placés l'un près de l'autre. Il faudra de plus s'assurer, de temps à autre, que l'isolement de ces deux fils est parfait parce qu'un défaut d'isolement insuffisant pour produire une diminution sensible de lumière pourrait produire cependant une erreur comparable à celle provenant de l'emploi d'un seul fil.

Quand on emploie au contraire une machine à courants alternatifs, même à un seul fil, il n'y a rien à craindre pour le compas.

En un mot, toutes les fois qu'on pourra craindre l'existence d'un courant électrique dans le voisinage du compas et dans la coque du bâtiment, il faudra, s'il y a de la vue, prendre fréquemment des observations de variation, et par nuit noire, ou par temps de brume, recourir à l'observation de force horizontale, correspondante à la route faite, soit au moyen du déflecteur, soit au moyen de la méthode des oscillations quand on n'a pas cet instrument. Enfin, si le temps est trop mauvais pour qu'on puisse faire ces observations de force horizontale, il faudra, ou vérifier avec le plus grand soin l'isolement des conducteurs, ou recourir à une extinction momentanée pour s'assurer que les comparaisons des divers compas restent les mêmes que le courant passe ou non dans les fils.

Nota. — Regarder à la fin du volume les figures représentant l'influence du cap de construction du navire sur le magnétisme du navire.

FIN DE LA PREMIÈRE PARTIE

DEUXIÈME PARTIE

RÉGULATION DES COMPAS

CALCUL DES COEFFICIENTS APPROCHÉS AU MOYEN D'OBSERVATIONS DE DÉVIATIONS SEULEMENT

INTRODUCTION

Nous allons donner les règles qu'il faut observer pour installer le compas à bord et pour faire exactement les observations nécessaires à la régulation ou à la compensation des compas.

Quand le bâtiment est droit et que la déviation du compas ne dépasse jamais 20 degrés à aucun cap, il suffit, nous le savons, pour obtenir cette déviation à un cap quelconque, de connaître la valeur des cinq coefficients approchés, dont trois sont constants et deux seulement variables. Nous donnerons des tableaux permettant de faire rapidement le calcul des cinq coefficients. Dans un lieu quelconque, comme nous l'avons déjà dit plus haut, il suffira donc d'observer la variation à deux caps pour pouvoir calculer les deux seuls coefficients variables et ensuite dresser une table complète de déviations pour tous les caps.

Dans la troisième partie nous verrons que quand on a calculé le paramètre constant λ, il suffit, même pour avoir les deux coefficients variables, de faire, *à un seul cap,* celui de la route suivie par le bâtiment, une observation de variation et une autre de force directrice; enfin, dans la cinquième partie, nous verrons comment on peut obtenir ces coefficients par des observations de force directrice seulement et sans même avoir besoin de prendre aucun relèvement.

Quand le bâtiment donne de la bande, il faut, pour tenir compte de cette circonstance et obtenir la valeur nouvelle de la déviation quand on connaît l'angle de bande, calculer un sixième coefficient qu'on détermine par une observation, soit de variation quand le bâtiment est incliné, soit de force directrice quand le bâtiment est droit, à condition, dans ce dernier cas, d'avoir une aiguille d'inclinaison à sa disposition. Très souvent, et à grand tort, on ne calcule pas ce sixième coefficient. Il se produit alors entre les valeurs calculées et observées de la déviation des divergences qu'on attribue à des déviations anormales ou à l'inexactitude de la théorie et qui disparaîtraient ou se réduiraient à des valeurs comparables à celles des erreurs d'observation si on avait tenu compte de ce coefficient.

Conditions d'exactitude des observations. — 1. Examen préliminaire du compas.

a. L'exactitude des observations dépend, avant tout, du bon état du pivot et de la chape. Il faut donc commencer par faire subir à ces deux pièces un examen à la loupe attentif et minutieux. On doit changer ces pièces dès qu'on aperçoit à leur surface une rayure ou une gerçure ou même dès que la surface de la chape n'est pas parfaitement polie.

b. On s'assure ensuite que la rose est bien centrée dans la cuve, c'est-à-dire qu'elle peut faire un tour entier de 360 degrés sans frotter, en aucun point, les parois qui l'environnent.

c. Pour avoir une idée de l'exactitude des indications du compas, on doit déterminer ce qu'on appele l'erreur due au frottement. Pour cela on transporte la cuve et la rose du compas à terre, dans un lieu libre de fer; on fait coïncider la ligne de foi avec le Nord de la rose, puis on écarte, à diverses reprises, cette dernière de sa position d'équilibre au moyen d'un aimant auxiliaire ou d'une autre rose. On aura soin de présenter l'aimant perturbateur dans le plan même des aiguilles, de l'éloigner ensuite dans le même plan, de telle façon que la rose n'ait pas d'oscillations dans le sens vertical et tourne en restant dans le même plan horizontal. On donne à la rose différents angles d'écarts, compris entre 30 et 1 ou 2 degrés, tantôt d'un bord, tantôt de l'autre; deux au moins doivent être moindres que 5 degrés. Après chaque écart, on laisse la rose revenir librement à sa position d'équilibre, on note le cap indiqué lorsqu'elle est en repos. L'écart qui existe entre les deux caps les plus distants l'un de l'autre sert de mesure à l'erreur due au frottement. Le compas est d'autant meilleur qu'elle est plus faible. Pour que le compas puisse être considéré comme bon, cet écart ne doit pas dépasser un degré. Ceci fait on écarte la rose de sa position d'équilibre, à terre, d'un angle d'environ 40 degrés, puis la laissant revenir librement à cette même position, on compte le temps de dix oscillations simples de la rose. On notera ce temps, ainsi que le lieu de l'observation sur le registre spécial destiné au compas. On comparera ce temps d'oscillation à celui qui a dû être donné par le constructeur de l'atelier qui a délivré la rose : on pourra ainsi vérifier si l'intensité magnétique des aiguilles n'a pas varié, si le pivot et la chape sont dans un état aussi satisfaisant que celui dans lequel ils ont été livrés par le constructeur.

Cette observation donnera de plus le moyen d'avoir, aux différents caps principaux de la rose, la valeur du rapport de H' à H dont nous avons montré toute l'importance précédemment.

d. Les roses, toutes choses égales d'ailleurs, se comportent d'autant mieux au roulis que la durée de leur oscillation est plus considérable. Cette durée doit être de quatorze à quinze secondes au moins et mieux dix-huit ou vingt secondes pour aller d'un bord à l'autre.

2. Du Bâtiment.

L'exactitude des observations est d'autant plus grande que l'état magnétique du bâtiment est plus près de l'équilibre.

Il faut donc tenir grand compte des circonstances dans lesquelles le bâtiment se trouvait auparavant. A cet égard, il est bon de ne jamais procéder à la régulation ou à la compensation immédiatement après la sortie du bâtiment du bassin ou de tout autre poste dans lequel il aurait gardé le même cap pendant plusieurs jours. Cette prescription est d'autant plus rigoureuse que le bâtiment est plus neuf, contient des masses plus considérables de fer, que le même cap a été gardé plus longtemps et qu'il était plus rapproché de l'Est ou de l'Ouest magnétique.

On doit donc, si on le peut, attendre pour effectuer les observations que le bâtiment ait fait en rade et à l'ancre, sous l'influence du vent et de la marée, quelques tours d'horizon alternativement dans un sens et dans l'autre. Quand on est trop pressé par le temps pour s'imposer un délai semblable, il faut, avant de procéder à la régulation ou à la compensation, et dans la sortie du bâtiment pour l'essai de la machine, avoir soin de lui faire exécuter en marche plusieurs tours d'horizon, exécutés en abattant alternativement sur bâbord et sur tribord. Deux tours au moins sont nécessaires. Dans ces conditions on pourra encore obtenir des observations suffisamment exactes. Plus le bâtiment est neuf et plus il est essentiel d'observer strictement ces prescriptions.

3. Du Temps.

Le temps doit être assez beau, la mer assez calme, l'arrimage assez bien fait pour qu'on puisse considérer, sans erreur sensible, le bâtiment comme droit sur sa quille pendant toute la durée des observations.

A un cap quelconque on ne doit faire l'observation définitive, soit de variation, si on opère par relèvements, soit de force directrice si on opère sans relèvements, qu'après avoir gardé ce cap quatre ou cinq minutes au moins, sans faire d'embardées de plus de quatre à cinq degrés.

Ce temps n'est d'ailleurs pas perdu, on l'emploie à faire des observations préliminaires qui rendent plus rapide et plus sûre l'observation définitive.

Le navire doit être placé le plus exactement possible sur les différents caps indiqués.

A la mer, on doit gouverner aussi droit que possible au moyen d'un compas auxiliaire placé à deux mètres cinquante au moins du compas à régler ou à compenser. Dans tous les cas, on doit veiller avec le plus grand soin à ne pas faire d'embardées de plus de quatre à cinq degrés pendant l'attente de l'observation, et à gouverner très droit pendant la minute nécessaire à cette observation.

Il faut recommencer celle-ci quand on n'a pas pu se conformer à ces prescriptions.

A chaque cap, il ne faut jamais se contenter d'une seule observation de variation, mais en prendre coup sur coup deux ou trois. On prend la moyenne des trois nombres obtenus pour valeur de la variation, dont on déduit celle de la déviation.

Des erreurs d'observation. — En réunissant les causes si multiples d'erreurs qui entachent la détermination d'une variation, erreurs de visée, de lecture, des tables ou du calcul, de frottement, on s'aperçoit aisément que même dans des observations faites avec le plus grand soin, elles peuvent monter aisément à 1 degré. Si on ajoute aux erreurs précédentes celles qui proviennent du retard de l'induction, de l'influence d'une route ou d'un cap gardé pendant quelque temps on arrivera aisément à 2 degrés et même plus. Et c'est ainsi que s'explique très naturellement la différence, très notable parfois, trouvée entre les valeurs des déviations correspondant à un même cap du compas, quand elles ont été déterminées dans deux tours d'horizon faits en sens contraires.

En général, à bord des bâtiments cuirassés ou tout en fer, on ne peut guère compter réduire ces divergences à moins de 1 degré, à moins que l'installation du compas et les observations n'aient été faites avec un soin tout particulier, exigeant un temps qu'on n'a pas toujours à sa disposition.

CHAPITRE PREMIER

INSTALLATION DES COMPAS A BORD

Nous ne nous occuperons, dans tout ce qui suit, que du Compas principal du bâtiment, celui qu'on appelle en France Compas-étalon ou Compas de Relèvement, et en Angleterre Standard-Compass.

Une fois que nous l'aurons choisi d'après les règles précédentes, il faudra l'installer à bord.

Puisqu'on doit prendre les relèvements avec ce compas, il faut qu'il commande tout l'horizon, et pour cela on devra, au moyen d'un pilier, l'élever au-dessus des bastingages.

Pour que les relèvements soient bons, il faudra que le compas soit parfaitement fixe pendant les observations, ce qui impose l'obligation d'avoir un pilier très fort, très solidement ajusté au pont, et de plus placé de telle façon que le compas lui-même ne risque point de recevoir de chocs accidentels des hommes employés sur le pont, ou des manœuvres elles-mêmes.

La nécessité d'avoir des déviations faibles, ou tout au moins régulières, montre qu'il faut éloigner autant que possible le compas de toute masse de fer un peu considérable.

Enfin, puisque, durant la construction, l'action prolongée de la terre imprime au navire un caractère magnétique déterminé, sous-permanent comme nous l'avons appelé, il faudra, en plaçant le pilier, avoir égard au cap que le navire avait en chantier.

En résumé, pour ne pas être obligé, au moment de l'armement, et à cause des nécessités de tous ordres du service, de donner au compas une position défavorable, on devra se pénétrer des conditions suivantes :

1° Dans tout plan ou projet de bâtiment, on devra ménager à l'avance une place pour le compas;

2° Cette place sera déterminée d'après le cap connu du bâtiment pendant sa construction.

En se reportant à ce que nous avons dit (p. 75) de l'influence de ce cap, et qui peut d'ailleurs se résumer, en disant, d'une façon générale, que, pour les navires *construits dans l'hémisphère Nord*, l'extrémité Nord de l'aiguille aimantée est attirée vers la partie du bâtiment qui était Sud pendant la construction ; on voit que, pour un navire construit dans notre hémisphère, le cap au Nord, le compas devra être aussi loin que possible à l'avant du bâtiment. — Si on a construit cap au Sud, le compas devra être aussi loin que possible derrière. Enfin, pour des navires construits cap à l'Est ou cap à l'Ouest, le compas ne doit pas être trop près des extrémités du navire, près desquelles la largeur étant moindre, le magnétisme des murailles du bâtiment agit avec plus d'énergie.

N'oublions pas qu'à ces mêmes caps, et pour un bâtiment construit dans l'hémisphère Sud, les prescriptions seraient inverses.

Dans notre hémisphère, et pour un navire destiné à ne pas le quitter, le meilleur cap de construction est le Sud, à cause de la place occupée ordinairement par le compas.

Si le navire doit naviguer dans les deux hémisphères, il convient de le construire cap à l'Est ou cap à l'Ouest, ou le plus près possible de ces deux caps.

Afin de diminuer autant que possible l'intensité du magnétisme développé pendant la construction, par l'influence terrestre, il conviendra, aussitôt le bâtiment lancé et pendant son armement, de le maintenir à un cap diamétralement opposé.

3° Dans tous les cas, on fera grande attention que le compas étalon soit à une distance au moins égale à la demi-largeur du bâtiment, de la tête du gouvernail, de l'étambot, du puits vertical de l'hélice, de la cheminée, des mâts s'ils sont en fer, enfin de toute pièce de fer un peu considérable ayant une position verticale ;

4° Le compas devra être éloigné autant que possible des baux en fer, $2^{m},50$ à 3 mètres au moins ;

5° Toutes les masses en fer, telles que caisses à eau, chaudières, machines, cloisons, devront être placées aussi loin que possible du compas, et autant que possible la ligne qui joint le centre du compas au centre de figure de ces pièces devra faire avec la verticale du premier de ces points un angle de 55 degrés au moins (*V. notes*).

Mais les nécessités du service à bord, les panneaux, les embarcations en chantier, les cuisines, les cheminées, les mâts, la nécessité de pouvoir établir les voiles-goélettes, enfin l'emploi de plus en plus général du fer pour tous les objets d'armement et de gréement, rendent toujours difficile et parfois impossible l'exécution de toutes ces prescriptions, qu'il faut considérer comme des desiderata dont on doit s'efforcer de se rapprocher le plus possible.

Dans bon nombre de steamers, naviguant d'ordinaire dans des parages rendus dangereux par des brisants, des bancs, ou la fréquence de la brume, on installe le compas-étalon au sommet d'un mâtereau particulier de 3 à 4 mètres de haut. Les inconvénients de cette solution sont multiples. D'abord l'expérience montre que, dans cette position élevée, et même avec des roulis modérés du navire, les oscillations de la rose peuvent atteindre jusqu'à 20 degrés de chaque côté du plan de niveau qu'aurait la rose, si elle était, ainsi que le bâtiment, en repos. De plus, cette installation rend difficile la manœuvre de la brigantine, elle oblige souvent à diminuer notablement sa surface, bref, elle nuit à l'efficacité de l'un des facteurs les plus importants de la manœuvre du bâtiment; enfin, le poste du capitaine ou de l'officier de quart étant sur la passerelle, afin de pouvoir commander à la fois la manœuvre des voiles et de la machine, tout en veillant l'avant du bâtiment, il est obligé de se fier pour la route aux indications que lui donne un timonier, et ce dernier se trouve parfois assez loin pour que, dans les circonstances les plus délicates, celles de mauvais temps, de brume, etc., on soit obligé de faire répéter ce qu'il dit par des hommes postés dans des situations intermédiaires.

Il faut donc craindre, non seulement les erreurs d'observation du timonier qui est à la rose, mais aussi les erreurs de transmission et la confusion, toujours regrettable, souvent dangereuse, qui se produit toutes les fois qu'on entend, sur le pont d'un navire, tout autre bruit que celui des commandements du capitaine.

On peut affirmer, d'ailleurs, que jamais un capitaine ou un officier de quart n'est réellement tranquille, ni parfaitement maître de sa manœuvre, tant qu'il n'a pas à sa portée un compas dont il soit sûr, et qu'il puisse consulter à chaque instant, sans avoir pour cela à quitter même momentanément le commandement de la machine ou la surveillance de la voilure.

Et comme la passerelle est le plus souvent directement au-dessus de la machine, très près de la cheminée, assez voisine de toutes les pièces de fer de l'avant, on voit qu'on ne pourra, dans la plupart des cas, obtenir de faibles et régulières déviations qu'en ayant recours à la compensation.

Mais, laissant de côté tout ce qui concerne cette dernière, occupons-nous d'abord des moyens d'obtenir la route du bâtiment d'une façon sûre avec un compas placé le mieux possible et non compensé.

CHAPITRE II

VARIATION. — DÉCLINAISON. — DÉVIATION

La route qu'il faut faire pour aller d'un point du globe à un autre s'obtient aisément sur les cartes marines. Il suffit de joindre les deux points par une droite, et de noter l'angle constant que cette droite fait avec les méridiens successifs.

Mais cette droite indique l'angle de route vrai qu'aucun instrument ne nous donne d'une manière continue, et que les observations astronomiques seules, quand nous sommes à la mer, nous permettent de trouver pour l'instant même de l'observation.

Dans l'intervalle, on se sert, pour se maintenir sur la droite tracée, de la rose du compas, et celle-ci nous donne l'angle de la route du navire, non pas avec la direction de la ligne N. S. vraie, mais bien avec la ligne N. S. du compas.

L'angle qui sépare ces deux lignes N. S. s'appelle la variation du compas.

Variation du compas. — Conventions. — C'est cette quantité dont on a besoin pour résoudre le problème primordial de la navigation:

1° Étant donné une route vraie, quelle route faut-il suivre au compas?

Et 2°, réciproquement, étant donné une route au compas, quelle route vraie représente-t-elle?

Suivant les conventions, déjà adoptées pour les caps du navire, nous dirons que la variation est occidentale, *n o*, ou négative, quand le Nord de l'aiguille aimantée tombe entre le Nord et l'Ouest vrais; et on l'affecte du signe — dans les calculs.

Au contraire, la variation est dite orientale, *n e*, ou positive, quand la pointe Nord de l'aiguille tombe entre le Nord et l'Est vrais.

La variation provient évidemment de deux causes : l'action du magnétisme terrestre, et celle du magnétisme du navire sur l'aiguille aimantée.

Déclinaison magnétique. — Le magnétisme terrestre, qui oriente l'aiguille aimantée, lui fait indiquer, non la direction du méridien géographique ou vrai, mais celle du méridien magnétique. L'angle de ces deux directions s'appelle la Déclinaison; nous avons dit déjà comment on définit cette quantité, et comment on la fait entrer dans les calculs. Les conventions faites à son sujet sont identiquement les mêmes que celles faites pour la variation.

Déviation du compas. — Le magnétisme du navire à son tour écarte, dévie, l'aiguille aimantée de la ligne N. S. magnétique, d'un angle qu'on appelle la « Déviation ».

Rappelons que l'on appelle la déviation occidentale, *n o,* ou négative quand la ligne N. S. du compas tombe entre le Nord et l'Ouest magnétique : on la compte alors négativement dans les calculs.

Au contraire, la déviation est dite orientale, Nord-Est ou positive, quand la ligne N. S. du compas tombe entre le Nord et l'Est magnétique ; et dans ce cas on la compte positivement dans les calculs.

Règle mnémonique pour trouver immédiatement le signe de la variation et de la déviation. — Si le cap vrai du bâtiment, supposé rapporté sur la division de la rose du compas qui lui correspond, tombe à droite du cap indiqué par le compas, pour un observateur placé au centre de la rose et regardant dans la direction du cap au compas, la variation est positive ou Est.

Quand, au contraire, ce cap vrai, ainsi rapporté et regardé, tombe à gauche du cap indiqué pour le compas, la variation est négative ou Ouest.

Cette règle s'applique identiquement à la déviation, si on y remplace les mots variation et cap vrai respectivement par les mots déviation et cap magnétique.

Relation entre la variation, la déclinaison et la déviation. — Les conventions identiques faites pour les trois quantités : Variation, Déclinaison et Déviation, font qu'elles sont évidemment liées par l'équation.

$$\text{Variation} = \text{Déclinaison} + \text{Déviation}. \tag{29}$$

Étant donné deux de ces quantités, on trouvera la troisième sans difficulté ni ambiguïté, en se rappelant que les valeurs des deux quantités données devront être introduites dans l'équation à la place de leur nom, mais affectées du signe déterminé par les conventions précédentes.

Exemple : Dans un lieu où la déclinaison est 10 degrés *no*, on sait que la déviation est 15 degrés *ne* : quelle est la variation correspondante?

On aura évidemment :

$$\text{Variation} = -10 + 15 = +5 \text{ degrés}.$$

c'est-à-dire que la variation est 5 degrés *ne*.

2° A un cap donné du navire, la variation observée est 12 degrés *ne* : d'ailleurs, la déclinaison du lieu où l'on se trouve, donnée par les cartes, est de 8 degrés *no* : quelle est la déviation du compas?

On aura dans ce cas :

$+ 12 = - 8 + \text{déviation}$, d'où déviation $= + 12 + 8 = + 20°$, c'est-à-dire que la déviation est 20 degrés *ne*.

Relation entre la route vraie, la route au compas et la variation. — En négligeant la dérive qu'on introduit aisément dans les calculs, d'après les mêmes conventions, quand cela est nécessaire, il est évident que nous avons la relation générale (30) :

$$\text{Route vraie} = \text{route au compas} + \text{variation},$$

qui nous permet de passer de la route vraie à la route au compas et réciproquement, exactement de la même façon que nous venons de passer de la déviation à la variation et *vice versa*.

Passer d'une route vraie à la route du compas correspondant. — Exemples : 1° Pour aller d'un point à un autre, on doit faire le S. 85 O. vraie. — La variation est 20 degrés *no*.

Quelle route faut-il faire au compas? On aura évidemment :

$$+ \text{S. } 85 \text{ O.} = \text{route compas} - 20°,$$

d'où : $\text{route compas} = + 85 + 20 = \text{S. } 105 \text{ O.} = \text{N. } 75 \text{ O.}$

2° On doit toujours faire la même route vraie, mais la variation est 15 degrés *ne* : on demande la route au compas?

On a alors : $+ \text{S. } 85 \text{ O.} = \text{route compas} + 15°,$

d'où : $\text{route compas} = \text{S. } 85 \text{ O.} - 15 = \text{S. } 70 \text{ O}$

On arrive, sans calcul, aux mêmes résultats au moyen de la règle mnémonique précédente, qui indique qu'il faut, dans ce cas, pour obtenir la route au compas cherchée, porter la variation *no* à droite et la variation *ne* à gauche de la route vraie, lue sur la rose du compas à la division qui lui correspond.

Réciproque.

Passer d'une route au compas à la route vraie correspondante. Exemples : 1° On fait au compas le N. 88 O. La variation est 10 degrés *n e.* Quelle est la route vraie?

On a : route vraie = — N. 88 O. + 10 = N. 78 O.

2° On fait au compas le S. 86 E. La variation est 15 degrés *n o.* Quelle est la route vraie?

Route vraie = — S. 86 E. — 15° = — S. 101 E. = N. 79 E.

On arrive encore, comme tout à l'heure, sans calcul aux mêmes résultats, en portant pour obtenir la route vraie, la variation *n o* à gauche et la variation *n e* à droite de la route au compas.

Désavantages des conventions employées habituellement pour compter les angles de route et les azimuts. — Ces problèmes élémentaires n'offrent aucune difficulté; ils exigent cependant une attention soutenue donnée aux signes des diverses quantités, et, de plus, l'usage de compter les angles de route de 0 à 90 degrés seulement et tantôt à partir du Nord, tantôt à partir du Sud, oblige parfois, comme dans les cas que nous avons choisis à dessein, à une conversion et un changement de signe de plus. Nous avons dit plus haut les inconvénients des conventions actuellement adoptées.

Avant de terminer, indiquons encore deux autres relations générales, souvent employées et qui sont des conséquences évidentes des définitions précédentes :

(31) Route vraie = route magnétique + déclinaison.

(32) Route magnétique = route au compas + déviation.

Les exemples numériques, donnés pour les deux problèmes précédents, nous dispensent d'en donner encore pour ces deux derniers, qui se résolvent exactement de la même façon, en remplaçant, dans l'équation convenable, les noms des deux quantités données par leurs valeurs numériques *affectées des signes convenables.*

Les trois équations (30), (31), (32), s'appliquent évidemment à tous les problèmes de relèvements; il suffit d'y remplacer le mot route par celui de relèvement.

Nous verrons plus tard l'avantage, la nécessité qu'il y a à décomposer la variation et à mettre en évidence les deux éléments qui la constituent, déviation et déclinaison; mais comme la variation est en somme seule indispensable à connaître pour les besoins de la navigation, montrons d'abord comment on la trouve.

Précautions à prendre avant de déterminer la variation. — Puisque la variation dépend du fer du navire, il est bien clair qu'il ne faudra pas, dans les intervalles des observations, changer la disposition des pièces de fer voisines du compas, et qu'avant de les commencer, il faudra que toutes les pièces de fer du bâtiment, canons, boulets, mousqueterie, porte-manteaux d'embarcation, etc., soient fixés dans les positions qu'ils doivent avoir à la mer.

En somme, il n'y a qu'une méthode générale pour obtenir la variation correspondant à un cap donné. Elle consiste à viser, avec l'alidade du compas, un objet ou un astre dont on a, par les cartes ou par l'observation astronomique, l'azimut ou le relèvement vrai.

Les procédés seuls varient, suivant que le bâtiment est au bassin, en rade ou à la mer.

CHAPITRE III

MÉTHODES POUR OBTENIR LA VARIATION DU COMPAS

Bâtiment dans le port. — Méthode des relèvements réciproques. — Dans ce cas, on a peu de place à sa disposition, le bâtiment ne peut que pivoter sur lui-même, et, en général, la vue est très limitée par les maisons ou bâtiments environnants. On fait tourner le bâtiment au moyen d'aussières, on l'arrête sur un cap déterminé, et on observe dans cette position l'azimut au compas du centre du soleil ou d'un astre.

Des tables récentes, calculées les unes par M. Labrosse, les autres par M. Perrin, donnent, au même moment, l'azimut vrai du soleil ou de l'astre. Nous reviendrons tout à l'heure sur cette méthode générale. Pour le moment, nous insisterons sur le procédé qui est tout particulier à la position du bâtiment considérée. On l'appelle la méthode des relèvements réciproques. La déviation est donnée immédiatement par les observations. La déclinaison pour le lieu où l'on se trouve est donnée par les tables ou les cartes, et l'équation (29) permet de calculer la variation.

Voici en quoi consiste la méthode :

On porte le compas étalon à terre dans une place libre de fer et où, par conséquent, l'aiguille aimantée n'est soumise qu'à la force magnétique terrestre, et on vise, avec son alidade, un objet éloigné. On note le relèvement.

Avec un autre compas mis exactement à la même place, quand le compas étalon a été enlevé et placé assez loin pour n'avoir aucune action sur l'aiguille de ce second compas, on vise le même objet. Si on ne trouve pas le même relèvement que précédemment, ce qui proviendra des erreurs d'index, ou de divisions, ou de position de la rose, on notera la légère différence des deux compas et on en tiendra compte dans les observations postérieures.

La comparaison des deux compas ainsi faite, on remet le compas étalon à sa place à bord, et on installe le second compas dans un endroit libre de fer et choisi de telle sorte que de chacun des deux compas on puisse apercevoir et viser nettement le second.

Puis on fait tourner le bâtiment, on l'arrête sur un cap déterminé, et, dans cette position, on prend de chacun des deux compas le relèvement de l'autre.

Le compas de terre donne évidemment le relèvement magnétique de la droite qui joint les deux compas. Celui du bord donne le relèvement de la même droite au compas, c'est-à-dire affecté de la déviation. L'équation (32) nous donnera donc cette dernière quantité. D'où nous conclurons la variation comme nous l'avons dit plus haut.

Dans la pratique, il est bon, comme moyen de contrôle et pour éviter des erreurs qui obligeraient à recommencer les observations, de faire écrire à la craie sur un tableau noir par chacun des deux observateurs l'observation qu'il a faite. L'autre observateur, muni d'une longue-vue, vise le tableau noir, prend note de l'observation réciproque en même temps que de la sienne. La comparaison des deux listes montre s'il y a eu des erreurs commises et permet de trouver de suite les observations qu'elles entachent.

Bâtiment en rade. — Ici nous pouvons employer la méthode des observations astronomiques du soleil ou d'un astre de la *Connaissance des temps,* que nous exposerons dans le paragraphe suivant. Mais il est plus commode de prendre, avec l'alidade du compas du bord, les relèvements successifs d'un même objet éloigné quand le bâtiment change de cap. On obtient la rotation du navire soit au moyen d'aussières, soit au moyen d'un remorqueur ou d'une embarcation à vapeur.

Quand on ne peut distraire l'équipage des travaux du bord et qu'on n'a pas de remorqueur à sa disposition, mais qu'en revanche on a du temps devant soi, on ne fait pas tourner le bâtiment sur lui-même par des moyens artificiels. On met à profit, pour obtenir le relèvement d'un même objet à différents caps, l'évitage du bâtiment sous l'action du courant, du vent ou de la marée. Mais. dans ce cas, on doit faire grande attention à ne pas faire d'observation quand le bâtiment abat avec rapidité sur un bord ou sur l'autre. Un relèvement ne donne une variation exacte que s'il a été pris pendant que le bâtiment était fixe et alors que le bâtiment occupait cette position depuis déjà quelques minutes.

M. Gaussin a montré (voir plus loin) qu'on commettrait aisément des erreurs de 1 à 2 degrés provenant du retard du magnétisme induit, si on ne prenait pas cette précaution.

Erreur de parallaxe. — Une autre précaution indispensable, c'est de ne choisir, pour l'objet visé, qu'un point suffisamment éloigné.

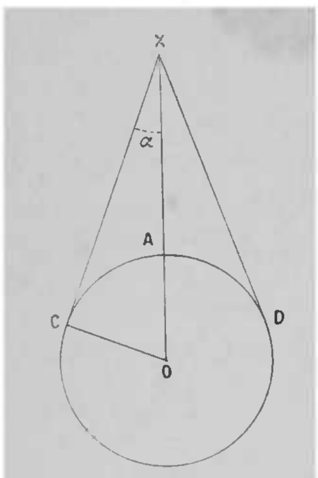


Fig. 22.

Soit, en effet, X l'objet visé, O le point autour duquel pivote le bâtiment dans sa rotation, OA le rayon du cercle que décrit le centre du compas dans cette rotation. La (*fig.* 22) montre que, sans que la déviation intervienne et par le seul fait des changements de position du compas sur le cercle ABCD, le relèvement de l'objet X, qui était primitivement, supposons OA, change d'autant plus que l'objet est plus rapproché du navire.

Soit OX le premier relèvement, le changement maximum du relèvement par suite de l'évolution du navire aura lieu évidemment quand ce dernier se trouvera en C et D, points de contact des tangentes menées du point X au cercle OA.

Ce maximum correspond à l'angle OXC que nous appellerons α.

Dans le triangle CXO, $\sin\alpha = \frac{OC}{OX}$.

Tant que α n'est que de quelques degrés, on peut remplacer le sinus par l'arc, et en agissant ainsi on ne commet qu'une erreur insignifiante, puisqu'elle est inféreure à $\frac{\alpha^3}{6}$; α étant exprimé en parties du rayon.

Prenons donc $\alpha = \frac{OC}{OX}$. Dans cette équation, α est exprimé en parties du rayon; c'est-à-dire que, si α est donné en degrés, on l'aura divisé par 57° 3; que, s'il est exprimé en minutes, on l'aura divisé par $57°3 \times 60 = 3438'$; que, s'il est exprimé en secondes, on l'aura divisé par $57°3 \times 60 \times 60 = 206265''$.

Pour qu'il n'y ait pas lieu dans la pratique de tenir compte de l'erreur introduite par l'évitage du navire et la distance de l'objet, il convient que α ne dépasse jamais 10 minutes.

On devra avoir :

$$\frac{OC}{OX} \times 3438' < 10'; \qquad \text{ou } \frac{OC}{OX} < \frac{10}{3438}$$

Il faudra donc que la distance de l'objet choisi soit égale ou supérieure à 350 fois le rayon d'évitage du compas. Si ce dernier est de 50 mètres, comme cela arrive fréquemment à bord des grands bâtiments, l'objet devra donc être à 17 kilomètres au moins. S'il est à une moindre distance, il conviendra de calculer la correction correspondante aux positions différentes du navire.

Supposons que nous ayons choisi un objet suffisamment éloigné pour n'avoir pas à tenir compte de cette correction.

L'objet devra être nettement visible, être de dimensions restreintes, de façon que la visée se rapproche le plus possible de celle d'un point lumineux, et que les jeux de la lumière à sa surface n'engendrent pas le phénomène connu sous le nom de « Phases du signal », qui consiste dans le changement de la position du point le plus brillant que l'on vise toujours. Ceci étant, les cartes nous donneront, en général, l'azimut astronomique ou vrai du point remarquable choisi.

Si pourtant ce point n'était pas marqué sur la carte, il serait aisé de calculer son azimut par la méthode ordinaire que nous allons rappeler.

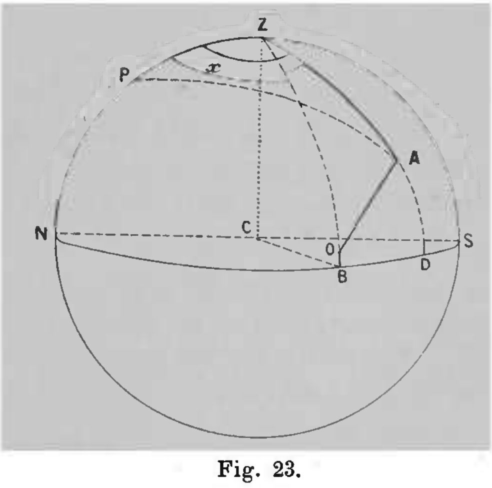


Fig. 23.

Soit dans la figure (23) P la position du pôle Nord terrestre, O l'objet dont nous voulons avoir le relèvement ou l'azimut astronomique x par rapport à un observateur qui se trouve en C, dont l'horizon est le cercle NBS et la verticale CZ.

Pour cela, à une heure connue, on observera simultanément en C:

1° La hauteur OB de l'objet au-dessus de l'horizon;

2° La hauteur AD d'un astre A de la *Connaissance des temps,*

3° La distance angulaire OA de l'objet à l'astre;

4° Le relèvement de l'astre au compas.

Notre inconnue x est l'angle PZB; dans notre figure, c'est la différence des deux angles PZA et BZA qu'on peut avoir, le premier dans le triangle PZA, le second dans le triangle OZA.

Supposons d'abord que l'astre A soit le soleil; nous verrons ensuite les légères modifications qu'il convient d'apporter quand cet astre est une planète ou une étoile.

Calcul de l'azimut vrai du soleil. — Pour obtenir l'angle PZA, dans le triangle de même nom, nous avons déjà le côté PZ ou λ qui est le complément de la latitude connue du lieu d'observation; le côté ZA ou Z, qui est le complément de la hauteur observée : quant au troisième côté PA, ou δ distance polaire du soleil, on le calcule aisément au moyen de la *Connaissance des temps.*

Quand la montre du bord est bonne et que sa marche est régulière, il suffit de prendre l'heure vraie qu'elle indique, en la corrigeant de la marche correspondante au temps écoulé depuis le midi vrai, heure du réglage quotidien de la montre. La longitude du lieu étant connue, on pourra passer de cette heure vraie à celle de Paris au même instant. Ayant ainsi calculé PA, si on appelle :

$$2s \text{ la somme } \delta + \lambda + z,$$

on aura dans le triangle PZA :

$$\cos {}^1/_2\, \widehat{PZA} = \sqrt{\frac{\sin s \sin (s - \delta)}{\sin \lambda \sin z}}.$$

Calcul de l'angle des deux verticaux. — Dans le triangle OZA, en appelant z' l'arc O z, d l'arc observé O A,

et $$2p \text{ la somme } z + z' + d,$$

on aura de même

$$\cos {}^1/_2\, \widehat{OZA} = \sqrt{\frac{\sin p \sin (p - d)}{\sin z \sin z'}}.$$

Calcul de l'azimut vrai de l'objet. — Dans notre figure, l'inconnue cherchée est la différence entre l'azimut astronomique de l'astre et l'angle des deux verticaux de l'astre et de l'objet; mais, si l'astre était dans le quadrant Nord-Ouest, l'inconnue serait la somme des deux mêmes angles. En faisant un croquis très simple correspondant aux circonstances de l'observation, on évitera toujours toute ambiguïté. Si on veut même éviter de se donner cette peine, on appliquera la règle suivante : Au moment où l'on observe la hauteur de l'astre, on voit si l'objet est placé à droite ou à gauche du vertical de l'astre. Dans le premier cas, on donne à l'angle des deux verticaux de l'astre et de l'objet le signe +, dans le second cas le signe —. L'azimut vrai de l'astre a d'ailleurs un signe déterminé actuellement par les conventions suivantes :

On compte l'azimut sur l'horizon à partir du point cardinal de même nom que le pôle élevé au-dessus de l'horizon de 0 à 180 degrés vers l'Est ou vers l'Ouest suivant que l'astre est dans l'Est ou dans l'Ouest. L'azimut ayant toujours le signe +, il suffira de lui ajouter l'angle des deux verticaux affecté d'un signe déterminé par les conventions précédentes. Si cette somme algébrique a surpassait 180 degrés, il est clair que l'azimut de l'objet, toujours $<$ 180 degrés d'après nos conventions, serait égal à $360° - a$, compté à partir du point N, mais dans le sens opposé à celui qui avait donné a : autrement dit, si notre règle des signes nous donne pour azimut astronomique de l'objet N 200 O°, nous saurons que l'azimut est N 160 E.

On peut se passer de ces calculs en se rappelant qu'il suffit, pour avoir le relèvement vrai de l'objet, de porter la différence d'azimut obtenue, sur la rose, à droite ou à gauche du relèvement vrai de l'astre, suivant que l'objet est lui-même à droite ou à gauche de l'astre au nombre de l'observation.

Calcul de l'azimut vrai d'un astre autre que le soleil. — Nous avons supposé que l'astre observé était le soleil ; supposons maintenant que c'est la lune, ou une planète, ou une étoile quelconque. Pour obtenir, à l'instant de l'observation, la distance polaire PA de l'astre qui nous est nécessaire, nous calculerons la déclinaison de cet astre pour l'heure donnée. Or la déclinaison de la lune et des planètes est donnée dans la *Connaissance des temps* pour l'heure moyenne de Paris. Il faut donc au préalable avoir cette dernière quantité. Le chronomètre du bord la donnera exactement. Et le reste du calcul s'effectuera comme plus haut.

Emploi des tables d'azimut. — Quand on a les tables récentes calculées les unes par M. Labrosse, ancien officier de marine, les autres par M. E. Perrin, lieutenant de vaisseau, ces calculs sont notablement abrégés, puisque ces tables donnent de suite l'azimut vrai de l'astre compté, comme nous l'avons dit plus haut, de 0 à 180 degrés vers l'Est ou vers l'Ouest à partir du point cardinal de même nom que le pôle élevé au-dessus de l'horizon.

Tables de M. Labrosse. — M. Labrosse donne de suite l'azimut vrai de l'astre A ou l'angle Z du triangle Z P A *fig.* (23) quand on connaît P Z ou la latitude du lieu, P A ou distance polaire de l'astre, et l'angle en P ou angle au pôle de l'astre.

On entre dans les tables avec ces trois arguments et l'on trouve de suite l'azimut.

Angle au pôle et sa recherche. — Rappelons que l'angle au pôle d'un astre quelconque est l'angle formé au pôle élevé par le cercle de déclinaison de l'astre avec le méridien supérieur, celui qui contient le zénith. On compte cet angle de 0 à 180 degrés de 0 à 12 heures vers l'Est ou vers l'Ouest, suivant que l'astre est dans l'Est ou dans l'Ouest. L'angle horaire d'un astre qui a la même définition que le précédent se compte d'une manière différente, et croît de 0 à 360 degrés ou de 0 à 24 heures dans le sens du mouvement diurne.

L'angle horaire et l'angle au pôle sont donc égaux quand l'astre est dans l'Ouest; mais, quand l'astre est dans l'Est, l'angle au pôle est égal à 360 degrés moins angle horaire.

Cet angle au pôle s'obtient facilement quand il s'agit du soleil; car le chronomètre donne l'heure moyenne de Paris au moment de l'observation; et, la longitude étant connue, on a facilement l'heure moyenne du lieu. L'équation des temps permet de passer à l'heure vraie. Si le soleil est dans l'Ouest, cette heure vraie est plus petite que 12 heures et représente l'angle au pôle. Si l'astre est dans l'Est, cette heure vraie est plus grande que 12 heures et on a l'angle au pôle en la retranchant de 24 heures.

A la mer, quand la montre d'habitacle marche bien et qu'on connaît sa marche entre deux midis, on calcule de suite un angle au pôle suffisamment exact en prenant l'heure indiquée par la montre, corrigée de la marche correspondant à cette heure-là. Il est également nécessaire de faire la correction relative au changement en longitude effectué depuis l'heure où la montre a été réglée, changement qui peut donner facilement 10 minutes d'erreur, si on observe le matin. Si l'observation a lieu après midi, cette heure vraie, convertie en degrés, est l'angle au pôle cherché. Si on observe avant midi, il faut retrancher l'heure marquée par la montre de 12 heures pour avoir l'intervalle de temps qui donne l'angle au pôle.

Si l'astre observé est une planète ou une étoile, la recherche de l'angle au pôle est un peu plus compliquée. Il se déduit toujours de l'angle horaire AH, qui lui-même s'obtient par la relation fondamentale :

$$H_s = \text{Æ} + \mathit{AH}.$$

L'ascension droite Æ est donnée par la *Connaissance des temps* au moyen de l'interpolation ordinaire. Quant à l'heure sidérale, elle peut se déduire de l'heure moyenne par deux procédés différents, suivant qu'on se sert pour cela du méridien céleste qui passe par Paris au moment même de l'observation, ou de celui qui passe par le soleil moyen, à midi moyen du lieu.

Dans le premier cas, on calcule, au moyen de la longitude connue du lieu, l'heure moyenne de Paris au moment de l'observation, on la convertit en heure sidérale, et on a ainsi le temps sidéral à cet instant, c'est-à-dire l'angle qui sépare le méridien céleste du point γ du méridien céleste de Paris. On n'a plus qu'à ajouter l'angle qui sépare le méridien de Paris de celui du lieu, c'est-à-dire la longitude, pour avoir l'angle horaire du point γ par rapport au méridien du lieu c'est-à-dire l'heure sidérale.

Dans la seconde méthode : Au moyen de la longitude du lieu, on a le temps sidéral au midi moyen du lieu considéré, ce qui donne l'angle qui à cet instant sépare les méridiens du point γ et du soleil moyen. On sait d'ailleurs qu'il s'est écoulé, depuis cet instant, un intervalle temps moyen donné par l'heure moyenne ; il suffit donc de convertir cette heure moyenne en temps sidéral et de l'ajouter au temps sidéral à midi moyen, pour avoir l'heure sidérale cherchée.

Celle-ci étant obtenue, l'équation précédente donne l'angle horaire dont on conclut l'angle au pôle.

Les tables de M. Labrosse donnent, au moyen des trois arguments indiqués plus haut, les azimuts vrais de tous les astres de la *Connaissance des temps* dont la déclinaison est comprise entre les deux parallèles célestes de 31 degrés et pour toutes les positions du navire comprises entre les deux parallèles terrestres de 61 degrés.

Tables de M. Perrin. — Les tables de M. Perrin donnent également les azimuts vrais de tous les astres de la *Connaissance des temps*, compris entre les deux parallèles célestes de 70 degrés et pour toutes les positions du navire comprises entre les deux parallèles terrestres de 70 degrés.

Mais on n'obtient pas l'azimut par simple lecture au moyen des trois arguments précédents.

Deux tables auxiliaires, qui servent à d'autres calculs usuels et dont les arguments sont, dans l'une, la déclinaison de l'astre et son angle au pôle ; dans l'autre, ce même angle au pôle et la latitude du navire, donnent deux nombres dont la somme algébrique n'est autre que la correction Pagel, c'est-à-dire la variation produite sur l'heure locale pour une augmentation de 1 minute dans la latitude. Avec cette correction Pagel et la latitude du navire comme arguments, on entre alors dans une troisième table qui donne l'azimut de l'astre.

Pratique de l'observation. — Nous avons dit plus haut qu'on déterminait *simultanément* la valeur de quatre angles, ce qui suppose quatre observateurs. Mais, si l'on réfléchit que la hauteur de l'objet est constante et ne varie pas avec le temps, on voit qu'elle peut être déterminée à part et qu'on n'a plus besoin que de trois observateurs.

Le relèvement au compas de l'astre peut être fait par le timonier qui aide d'ordinaire l'officier des montres.

Enfin tout officier un peu exercé peut prendre successivement les deux angles qui restent avec une rapidité assez grande pour qu'on puisse considérer, sans erreur sensible pour le problème qui nous occupe, ces deux observations successives comme simultanées.

En somme, deux observateurs suffisent, et même seulement un observateur et un aide.

En résumé, soit par les cartes, soit par les calculs très simples que nous venons d'exposer, on aura le relèvement ou l'azimut vrai d'un objet remarquable, nettement visible du navire et suffisamment éloigné de lui pour qu'il n'y ait point lieu de tenir compte de la correction de parallaxe; à différents caps du navire, on relèvera cet objet au compas. La comparaison de ce relèvement avec l'azimut vrai donnera la variation cherchée au cap correspondant.

CHAPITRE IV

COURBES ET TABLES DE VARIATIONS ET DE DÉVIATIONS

En général, et surtout quand on détermine la variation au moyen de l'évitage naturel du bâtiment, les relèvements de l'objet visé ne sont pas pris à des caps équidistants. Le nombre des observations à faire varie suivant les cas.

Si le bâtiment vient d'être construit et prend la mer pour la première fois, ou bien si l'on a changé à bord soit la place du compas étalon, soit la disposition des pièces de fer qui l'environnaient, il convient d'avoir au moins 20 observations de variation distribuées à autant de caps, à peu près uniformément espacés sur la rose. D'ailleurs la valeur de la déviation qu'on peut déduire aisément de celle de la variation donne à cet égard des indications précieuses. Si la déviation du compas atteint 18 à 20 degrés de valeur absolue, il vaut mieux avoir 20 à 25 observations; si la déviation ne dépasse pas 15 degrés, 15 à 20 observations suffiront.

Si faibles que soient les valeurs absolues de la déviation, il faut toujours, pour une première étude du bâtiment après un armement, un ensemble d'au moins 12 à 15 observations.

On recueille toutes ces observations de variation dans une table disposée de la façon suivante.

Il suffit en général d'inscrire les différents relèvements et variations au quart de degré près, les observations ne comportant pas une approximation plus grande, même quand elles sont faites dans les meilleures circonstances et avec le plus grand soin.

TABLE DE VARIATION DITE TABLE I_v

OU

Type pour enregistrer les observations de variation faites en rade pendant que le bâtiment évite sous l'action du vent ou de la marée.

NOM DU BATIMENT. DATE ET LIEU DE L'OBSERVATION.

Relèvement vrai N 83° 30′O.

CAP du BATIMENT au compas étalon.	RELÈVEMENT au COMPAS.	VARIATION.	CAP du BATIMENT.	RELÈVEMENT au COMPAS.	VARIATION.
N 17 E	N 68° 20′ 0	— 15° 10	S 57 0	N 50° 30′ 0	— 33°
N 35 E	N 76° 30′ 0	— 7°	S 75° 30′ 0	N 44° 30′ 0	— 39°
N 61 E	N 82° 0	— 1° 30′	N 85° 0	N 38° 30′ 0	— 45°
N 86 E	N 82° 30′ 0	— 0°	N 67° 30′ 0	N 37° 15′ 0	— 46° 15′
S 74 E	N 81° 15′ 0	— 2° 15′	N 52° 0	N 38° 15′ 0	— 45° 15′
S 50 E	N 77° 30′ 0	— 6°	N 47° 0	N 41° 0	— 42° 30′
S 33 E	N 73° 45′ 0	— 9° 45′	N 25° 0	N 45° 30′ 0	— 38°
S 9 E	N 67° 45′ 0	— 15° 45′	N 13° 0	N 52° 45′ 0	— 30° 45′
S 14 O	N 61° 30′ 0	— 22°	N 2° 0	N 58° 30′ 0	— 25°
S 31° 30′O	N 57° 30′ 0	— 26°			

Pour avoir la variation correspondant à un cap qui n'est pas dans la table, on fera une interpolation au moyen d'une simple règle de trois entre les deux caps de la table qui comprennent celui-là. Il est plus commode pour éviter ces interpolations de construire une courbe de variation.

Courbe des variations. — Pour cela on prend une feuille de papier, et on trace sur cette feuille une droite aussi longue que le papier le permettra. Cette droite représentera la circonférence de la rose rectifiée, ce sera la ligne des abscisses de la courbe. En la partageant en 360 parties égales, chacune des divisions représentera un degré de la rose. Si des points de division trop nombreux devaient entraîner quelque confusion, on se bornerait à indiquer les points de division qui correspondent aux 32 quarts de la rose, N, N.q.NE, N.NE, etc., voir (*fig.* 1) planche II à la fin du volume.

On marque également sur cette droite les points qui correspondent aux caps où l'on a fait des observations. En chacun de ces points on élève une perpendiculaire, à la droite des caps, et sur cette perpendiculaire on porte à une échelle arbitraire, qu'on devra prendre suffisamment grande, une longueur proportionnelle au nombre de degrés trouvé pour la variation à ce cap. On portera cette longueur à droite de la ligne des caps si la variation est Est; à gauche si elle est Ouest. Ces droites perpendiculaires à la ligne des abcisses s'appellent les ordonnées de la courbe.

Exemple : Au cap N 17 E on a trouvé 23° 30' variation Ouest.

Si on convient que chaque degré de variation sera représenté par une longueur de $0^{mm},5$, on portera sur la perpendiculaire une longueur de $23,5 \times 0,^{mm}5$ et à gauche de la ligne des caps puisque la variation est Ouest.

On aura ainsi tous les points que nous avons entourés d'un petit cercle; en faisant passer un trait continu par tous ces points, on aura la courbe des variations, qui permettra d'obtenir la variation à un cap quelconque.

Par exemple, pour avoir la variation au S 45 O qui n'est pas contenu dans notre table, on élèvera au point correspondant à ce cap, sur la ligne des caps, une perpendiculaire à cette droite. La longueur de cette perpendiculaire comprise entre la droite et la courbe étant de 31 divisions 25 centièmes de l'échelle adoptée, la variation est de 31°15'. La perpendiculaire étant à gauche de la ligne des caps, la variation est Ouest. Les constructions et mesures que nous venons d'exposer se simplifient considérablement si l'on a à sa disposition un papier quadrillé en carrés dont le côté représente un nombre exact de millimètres. Il suffit de compter les carrés pour avoir la valeur des quantités que l'on cherche.

Pour naviguer, on détermine la route vraie au moyen des cartes, et on doit la convertir en route au compas; on serait donc obligé de passer de la courbe précédente à une autre permettant de résoudre ce problème inverse du précédent. Puis, cette courbe tracée, on aurait pour chaque route nouvelle du bâtiment une construction géométrique à effectuer, ce qui serait incommode et long. On préfère, au moyen de la courbe précédente, déterminer les variations correspondantes aux 32 caps équidistants du compas qui portent sur nos roses des noms particuliers N, N q, NE, N. NE, etc. On réunit ces variations dans la table ci-jointe qui permet de résoudre les deux problèmes élémentaires et primordiaux de la navigation.

TABLE II, DITE TABLE DE ROUTE

donnant les variations correspondant aux 32 caps principaux du compas.

NOM DU BATIMENT. DATE ET LIEU DE L'OBSERVATION.

CAP du BATIMENT au compas étalon.	VARIATION.	CAP VRAI.	CAP au COMPAS.	VARIATION.	CAP VRAI.
Nord.	— 23° 40′	N 23° 40′ O	Sud.	— 17° 20′	S 17° 20′ E
N. q. N E.	— 17° 55′	N 6 40′ O	S. q. S O.	— 20° 25′	»
N. N E.	12° 20′	»	S. S O.	— 23° 30′	»
N E. q. N.	— 7° 20′		S O. q. S.	— 27°	»
N E.	— 3° 40′		S O.	— 30° 10′	»
N E. q. E.	— 1°		S O. q. O.	— 33°	»
E. N E.	0	»	O. S O.	— 36° 40′	»
E. q. N E.	+ 0° 35′	»	O. q. S O.	— 39° 45′	»
E.	— 0° 10′	»	O.	— 41° 40′	»
E. q. S E.	— 1° 15′	»	O. q. N O.	— 43° 50′	»
E. S E.	— 2° 25′	»	O. N O.	— 44° 30′	»
S E. q. E.	— 4° 0′		N O. q. O.	— 44° 05′	»
S E.	— 5° 50′	»	N O.	— 42° 30′	»
S E. q. S.	— 8° 25′	»	N O. q. N.	— 39° 30′	»
S. S E.	— 10° 50′	»	N. N O.	— 35° 20′	
S. q. S E.	— 14° 30′	S 25 45 E	N. q. N O.	— 29° 45′	N. 41 O.

Quand les variations sont considérables et changent rapidement, on peut encore resserrer les intervalles de la table précédente en espaçant les caps au compas de 5 degrés seulement.

La table précédente donne le moyen de résoudre à simple vue ou par une interpolation très simple les deux problèmes fondamentaux :

1° Étant donné une route vraie, trouver la route au compas qui lui correspond ; et sa réciproque,

2° Étant donné une route au compas, trouver la route vraie correspondante.

Le second problème peut se résoudre aussi sur la courbe des variations que nous avons tracée, et cela par des constructions très élémentaires, *si l'on a pris soin de représenter par la même longueur* un degré de la circonférence de la rose et un degré de variation de l'aiguille aimantée.

En appelant R le cap vrai, ζ' le cap au compas et V la variation correspondante, la formule :

$$R = \zeta' + V,$$

montre que dans chaque cas il faut pour avoir R ajouter algébriquement à ζ' une longueur égale à l'ordonnée de la courbe qui correspond à ζ'. On fait cette opération géométriquement soit en décrivant du point correspondant au cap du compas un arc de cercle ayant pour rayon l'ordonnée de la courbe, soit, ce qui revient au même, en menant, par le point de la courbe des variations qui correspond à ζ', une droite inclinée de 45 degrés sur la ligne des caps, dans un sens convenable suivant que la variation est Ouest ou Est. On forme, en effet, ainsi un triangle rectangle isocèle dont les deux côtés égaux sont l'ordonnée de la courbe et le côté situé sur la ligne des caps.

Mais nous n'insisterons pas sur cette construction parce que le premier problème se résout beaucoup moins facilement par le moyen de la courbe que par celui de la table. Il faut en effet, dans ce cas, ou faire une nouvelle courbe de variation correspondant au cap vrai, ou tracer tout au moins très près de la ligne des caps du compas une parallèle à cette ligne sur laquelle on inscrit les caps vrais trouvés par la construction indiquée plus haut, c'est-à-dire en face des positions qu'ils occupent sur la première ligne verticale. On joint alors par une droite les deux points représentant les caps au compas et les caps vrais qui se correspondent. Nous avons sur la figure 1, planche II, effectué la construction nécessaire pour les caps au compas N; N2O, et NE. q. N.

Que l'on adopte l'une ou l'autre de ces solutions, il y aura une complication de lignes, de notations, qui exige beaucoup d'attention, amène aisément des confusions et par conséquent des erreurs.

Diagramme de Napier (*fig.* 2, planche II). — M. J.-R. Napier, de Glascow, a donné la solution la plus pratique et la plus élégante des deux problèmes primordiaux qui ait été obtenue au moyen de courbes. Il a eu l'heureuse idée de porter les déviations correspondant aux caps au compas non pas sur des perpendiculaires à la ligne des caps, mais sur des lignes inclinées à 60 degrés sur cette droite, et que nous avons indiquées sur la figure 2, planche I, par des lignes ponctuées.

On trace de même, par chaque point de la ligne des caps correspondant à un cap principal, des lignes pleines également inclinées de 60 degrés sur la droite verticale, mais en sens inverse des droites ponctuées.

La relation générale $R = \zeta' + V$ montre que le choix de cet angle de 60 degrés fait de chaque point de la courbe des variations le sommet d'un triangle équilatéral dont la base est sur la ligne des caps et dont les côtés respectivement parallèles aux lignes pleines et aux lignes ponctuées vont couper la ligne des caps aux caps vrais et du compas qui se correspondent.

Par, suite nous aurons pour résoudre nos deux problèmes fondamentaux au moyen de ce diagramme les deux règles suivantes;

Règle I

Pour passer d'une route au compas à la route vraie correspondante. — Sur la ligne verticale prenez la route au compas donnée. Par ce point tracez une ligne parallèle aux lignes *ponctuées*, et du point où cette ligne rencontre la courbe menez une droite parallèle aux lignes *pleines*. Le point où cette dernière droite rencontre la ligne verticale donne la route vraie cherchée.

Règle II

Pour passer d'une route vraie à la route au compas correspondante. — Sur la ligne verticale prenez la route vraie, menez par ce point une parallèle aux lignes *pleines*, et par le point de rencontre de cette parallèle avec la courbe menez une droite parallèle aux lignes *ponctuées*. Le point de rencontre de cette droite avec la ligne verticale donne la route au compas cherchée.

Cette solution, on le voit, est très élégante; elle est très rapide si on a soin d'avoir des diagrammes tout préparés sur lesquels on n'ait plus qu'à porter les variations observées, on ne peut lui faire que le reproche général encouru par toute solution graphique qui réunit sur la même épure la résolution des deux problèmes à la fois.

Recommandations pratiques. — Il faut toujours se servir de courbes pour rassembler, coordonner les observations et trouver facilement les valeurs des inconnues intermédiaires aux observations faites.

Si on veut se servir des courbes pour la solution des deux problèmes de route primordiaux, il faut adopter le diagramme de Napier et avoir soin de prendre la même longueur pour représenter 1 degré sur la ligne des caps et 1 degré sur les ordonnées ponctuées qui sont proportionnelles aux variations.

Dans la pratique, l'officier des montres a avantage à construire une courbe de variations pour en déduire plus rapidement et plus exactement que par le calcul les éléments de la table II[1]. Mais celle-ci peut-être copiée par n'importe qui, on n'est pas obligé de lui donner comme à la courbe le format le plus considérable possible pour augmenter l'exactitude des résultats, ce sera donc elle qu'il sera préférable de coller sur une plaquette de bois pour la mettre sur le pont à la disposition de l'officier de quart.

Une pareille table est évidemment d'autant plus exacte que : 1° les observations ont été plus nombreuses, 2° qu'il s'est écoulé moins de temps entre son établissement et le jour où l'on s'en sert, enfin 3° que la force magnétique terrestre qui agit sur le fer du navire et sur la boussole a moins changé en grandeur et en direction, autrement dit que le bâtiment est plus près du lieu où l'on a fait les observations.

En particulier, dès que le navire se déplace nous avons vu que les deux éléments *Déclinaison* et *Déviation*, dont l'ensemble constitue la variation, varient tous deux, ce qui entraîne le changement de la variation. On comprend qu'il soit utile de séparer ces deux éléments provenant, l'un du magnétisme terrestre, l'autre de celui du navire, afin de savoir la part d'influence de chacun sur la grandeur et le sens de la variation.

Les cartes géographiques donnent la grandeur et le sens de la déclinaison, et, quant à la déviation, nous avons déjà expliqué comment on l'obtient en grandeur et en signe quand on connaît la *Variation* par l'observation et la *Déclinaison* par les cartes.

Tables et Courbes des Déviations. Pl. II (*fig.* 1 et 2). — En nous

1. Page 119.

reportant aux équations (30) (31) (32), nous voyons que l'on peut former des tables ou construire des courbes donnant la déviation du compas dans un lieu donné exactement de la même manière que nous avons obtenu la table I_v et la courbe I_v qui se rapportent aux variations. Il suffit, pour avoir une table de déviations correspondant à la table I_v, de remplacer le relèvement vrai de l'objet par son relèvement magnétique qu'on déduit aisément du premier quand on connaît la déclinaison. Supposons que cette dernière soit dans le cas qui nous occupe de 20 degrés N.O. ; nous aurons :

TABLE III_D

pour enregistrer les valeurs de la déviation, correspondant à divers caps du bâtiment.

Nom du batiment. | Lieu et date de l'observation.

Relèvement magnétique = N 63° 0 | Déclinaison adoptée 20° 30′ 0.

CAP du BATIMENT.	DÉVIATION.	CAP du BATIMENT.	DÉVIATION.
N 17 E	+ 5° 20′	S 57 O	— 12° 30′
N 35 E	+ 13 30	S 75 30 O	— 18 30
N 61 E	+ 19	N 85 O	— 24 30
N 86 E	+ 20 30	N 67 30 O	— 25 45
S 74 E	+ 18° 15	N 52 O	— 24 45
S 50 E	+ 14 30	N 47 O	— 22
S 33 E	+ 10 45	N 25 O	— 17 30
S 9 E	+ 4 45	N 13 O	— 10 15
S 14 O	— 1 30	N 2 O	— 4 30
S 30 30 O	— 5 30		

Quant à la courbe III_D des déviations, nous l'obtiendrons soit au moyen de la table III_D, soit tout simplement en retranchant de chacune des ordonnées de la courbe des variations la longueur constante qui représente la Déclinaison, soit ici : $20{,}5 \times 0{,}^{mm}5 = 10{,}^{mm}25$, on obtiendrait ainsi les points marqués d'une croix, que nous avons reliés entre eux par une courbe marquée en trait pointillé.

On déduira de cette courbe D une table IV^D qui contiendra les déviations de quart en quart pour tous les caps du compas;

cette table aura deux colonnes. La première donnera les caps au compas successifs, la seconde la déviation correspondant à chacun de ces caps.

TABLE IV_D

donnant les déviations du compas aux 32 *caps principaux de la rose.*

NOM DU BATIMENT *Trident* : LIEU ET DATE DE L'OBSERVATION : *Greennhithe.*
Relèvement magnétique : Déclinaison adoptée 20° 30′ 0.

CAP au COMPAS ÉTALON.	DÉVIATION.	CAP au COMPAS ÉTALON.	DÉVIATION.
Nord.	— 3° 10′	Sud.	+ 3° 10′
N. q. N E.	+ 2° 35′	S. q. S O.	+ 0° 05′
N. N E.	+ 8° 10′	S. S O.	— 3° 0′
N E. q. N.	+ 13° 10′	S O. q. S.	— 6° 30′
N E.	+ 16° 50′	S O.	— 9° 40′
N E. q. E.	+ 19° 30′	S O. q. O.	— 13° 0′
E. N E.	+ 20° 30′	O. S O.	— 16° 10′
E. q. N E.	+ 21° 05′	O. q. S O.	— 19° 15′
Est.	+ 20° 20′	Ouest.	— 21° 10′
E. q. S E.	+ 19° 15′	O. q. N O.	— 23° 29′
E. S E.	+ 18° 05′	O. N O.	— 24° 0′
S E. q. E.	+ 16° 30′	N O. q. O.	— 23° 35′
S E.	+ 14° 30′	N O.	— 22° 0′
S E. q. S.	+ 12° 05′	N O. q. N.	— 19° 00′
S. S E.	+ 9° 40′	N. N O.	— 14° 50′
S. q. S E.	+ 6°	N. q. N O.	— 9° 15′

Ces tables et ces courbes ne doivent être employées, comme nous l'avons dit plus haut que dans des lieux peu éloignés du lieu où l'on a fait les observations, surtout si le navire est en fer, neuf, et si le compas a de fortes déviations.

Remarques pratiques. — On peut affirmer qu'il est indispensable, quand on se sert de courbes, de tracer à part la courbe des variations et celle des déviations, chacune sur une feuille séparée, et de les distinguer encore soit par la nature, soit par la couleur du trait, et par des en-têtes très différents de façon qu'il ne puisse y avoir de méprise.

Elles sont juxtaposées sur nos figures pour les avoir toutes deux dans un petit espace, cela n'a d'ailleurs ici aucun inconvénient puisqu'elles servent seulement d'exemples théoriques.

En résumé, la Courbe ou la Table des Variations donne directement la solution des deux problèmes généraux de la navigation, tandis que la Courbe ou la Table des Déviations indique seulement l'effet produit sur le compas par l'état magnétique du bâtiment; on ne peut donc, avec la seule aide de ces dernières tables, résoudre les deux problèmes précédents, et il y faut joindre la connaissance de la déclinaison.

Bâtiment à la mer. — Quand le navire est à la mer, on peut obtenir de semblables courbes en faisant exécuter au bâtiment ce qu'on appelle un tour d'horizon. Pour cela on lui fait décrire un cercle complet en l'arrêtant de deux quarts en deux quarts, ou seulement sur les huit rumbs principaux, suivant le temps que l'on veut mettre ou les doutes que l'on a sur les indications du compas. On le maintient assez longtemps sur chaque cap pour pouvoir prendre un bon relèvement d'un astre au compas et les éléments du calcul ou de la détermination par les tables, de l'azimut vrai du même astre à ce même cap.

Précautions à prendre pour avoir un bon relèvement. — Il faut avant tout s'assurer que la rose n'est pas paresseuse, c'est-à-dire qu'elle se meut librement sur son pivot. Il suffit pour cela de légers coups sur la boîte du compas, ou, mieux, d'écarter légèrement l'aiguille de sa position d'équilibre en lui présentant un morceau de fer quelconque, et de la laisser ensuite revenir au repos. On peut aussi faire une légère embardée au moyen de la barre et s'assurer que la rose indique bien le changement de route.

Cela fait, on ne devra prendre le relèvement de l'objet ou de l'astre que dans un instant où le cap du bâtiment soit bien fixe, où le navire n'embarde ni d'un bord ni de l'autre de la route.

Dès que le navire a changé notablement de position géographique, il faut, pour être sûr de sa route, déterminer la variation correspondant à cette route par des observations astronomiques, et, comme les astres ne sont pas toujours visibles, il faudrait, pour se prémunir contre l'impossibilité des observations, saisir de temps à autre les circonstances favorables pour établir une table ou construire une courbe complète. Mais cette observation demande pour être bien faite quatre à cinq minutes pour chaque cap d'observation, à bord d'un bâtiment à vapeur. Elle exige donc un temps considérable qu'on peut ne pas vouloir ni pouvoir perdre : à bord des bâtiments à voiles, elle exigerait beaucoup plus de temps encore et beaucoup plus de peine, ce qui la rendrait encore plus pénible ou incommode à faire.

Fort heureusement, la théorie de Poisson, perfectionnée par M. Archibald Smith, appliquée par le capitaine Evans, éprouvée enfin par une pratique de quinze années à bord des bâtiments en fer de toute espèce, permet de simplifier notablement les opérations nécessaires pour se procurer une table de déviations.

CHAPITRE V

CALCUL DES CINQ COEFFICIENTS APPROCHÉS

Emploi de la formule simplifiée des déviations. — Nous avons indiqué dans la première partie les raisons qui obligent, dès que les déviations dépassent 20 degrés en grandeur absolue, soit à chercher une autre place pour le compas étalon, soit à compenser celui-ci de façon à ramener les déviations à des valeurs inférieures à cette limite.

Nous supposerons dans ce qui va suivre que les déviations sont toujours plus petites que 20 degrés en grandeur absolue.

Il en résulte que la déviation δ à un cap au compas ζ' est donnée par la formule (12)

$$(12) \qquad \delta = \mathrm{A} + \mathrm{B}\sin\zeta' + \mathrm{C}\cos\zeta' + \mathrm{D}\sin 2\zeta' + \mathrm{E}\cos 2\zeta',$$

qui ne contient que cinq coefficients et ne s'applique que dans cette limite.

Le problème général, connaître la déviation à un cap quelconque du bâtiment, est donc ramené à la détermination, par un procédé quelconque, de la valeur des cinq coefficients de l'équation indiquée.

Cinq observations de variation donnant cinq déviations suffiraient évidemment à cette détermination, puisque chaque observation nous donne une équation entre la déviation, le cap correspondant qui est connu, et les cinq coefficients que nous cherchons.

Mais on n'applique pas cette méthode naturelle à moins que les cinq caps en question ne soient les quatre directions cardinales et une direction intercardinale.

Comme, en général, on ne peut pas faire les observations rigoureusement à ces caps et que la résolution d'équations du premier degré, en nombre égal à celui des inconnues, entraîne des calculs fort compliqués dès que leur nombre dépasse trois, il est préférable de faire un plus grand nombre d'observations qu'on dispose de façon à simplifier notablement, au moyen des propriétés connues des lignes trigonométriques, les calculs nécessaires à la résolution des équations qu'elles fournissent.

Relations des lignes trigonométriques. — Rappelons quelques notions de trigonométrie dont nous aurons besoin.

La quantité qui jouera le principal rôle dans tous nos calculs, c'est l'angle ζ' que l'on fait varier de 0 à 360 degrés en partant du Nord pour y revenir, en passant successivement par l'Est, le Sud et par l'Ouest.

Afin de calculer rapidement, il est nécessaire de bien se rappeler comment on compte les lignes trigonométriques et comment elles varient avec l'arc.

D'après les conventions adoptées, toute ligne dirigée vers le Nord ou vers l'Est doit être comptée positivement. On doit compter négativement toutes celles dirigées vers l'Ouest ou le Sud.

Supposons que le cap du navire soit dirigé suivant CM, l'avant vers M (*fig.* 24). On a $\zeta' = \text{NCM}$. $\sin \zeta' = \text{PM}$. $\cos \zeta' = \text{CP}$. $\text{tg}\,\zeta' = \text{AR}$.

Enfin, sinus verse de $\zeta' = 1 - \cos \zeta' = \text{AP}$.

Quand ζ' varie de 0 à 360; le sinus positif dans le demi-cercle NES devient négatif dans le demi-cercle SON;

Le cosinus positif dans le quadrant NE devient négatif dans le quadrant ES et dans le quadrant SO pour redevenir positif dans le quadrant ON.

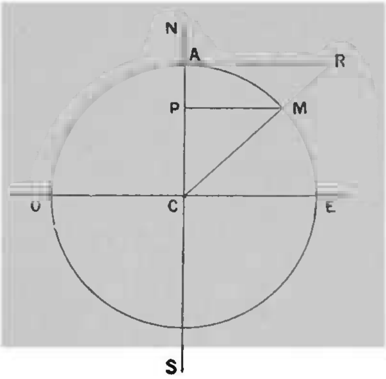


Fig. 24.

Deux arcs tels que leur somme soit égale à 90 degrés sont dits complémentaires l'un de l'autre, et, si nous les appelons a et b, on aura $a+b=90$.

$$\sin a = \cos b \quad \cos a = \sin b \quad \text{tg}\, a = \text{cotg}.\, b.$$

Deux arcs tels que leur somme soit égale à 180 degrés sont dits supplémentaires l'un de l'autre, et, si nous les appelons a et c, on aura:

$$a + c = 180,$$

$$\sin a = \sin c \quad \cos a = \cos c \quad \text{tg}\, a = -\text{tg}\, c.$$

Deux arcs a et d tels que leur différence soit égale à 180 degrés, ont entre leurs lignes trigonométriques les relations suivantes :

$$a - d = 180.$$

$$\sin a = -\sin d \quad \cos a = -\cos d \quad \operatorname{tg} a = \operatorname{tg} d.$$

Divisons la rose en un nombre quelconque de parties égales, prenons 32, parce que ce nombre correspond à celui des quarts de la rose. Désignons par ζ_0 le cap Nord, par ζ_1, ζ_2, etc., les quarts successifs, ζ_1 désignera le cap N q. NE, ζ_2 le cap N. NE, ζ_8 le cap Est ; ζ_{16} le cap Sud, ζ_{24} le cap Ouest, enfin, ζ_{31} le cap au N. q. N O. Cette manière de noter les caps est commode, on voit de suite en effet que deux arcs tels que la somme des indices de ζ soit égale à 8 sont complémentaires, que, si cette somme est égale à 16, ils sont supplémentaires, que, si la différence des indices est égale à 16, les arcs diffèrent de 180 degrés.

Exemples : ζ_2 et ζ_6 sont complémentaires, et ζ_2 et ζ_{14} sont supplémentaires. Enfin les arcs ζ_2 et ζ_{18} diffèrent de 180 degrés. Suivant le cas, on pourra, en appliquant aux lignes trigonométriques de ces arcs les relations convenables parmi celles qui ont été rappelées plus haut, simplifier notablement les expressions qui les contiennent.

En faisant usage de ces relations, il est facile de voir que la somme : $\sin \zeta_0 + \sin \zeta_1 + \qquad + \sin \zeta_{31}$ que nous désignerons par $\Sigma_{32} \sin \zeta$ est nulle.

En effet, $\sin \zeta_0$ et $\sin \zeta_{16}$ sont nuls, $\sin \zeta_1 = -\sin \zeta_{17}$ et ainsi de suite jusqu'à $\zeta_{19} = -\sin \zeta_{31}$, c'est-à-dire que les termes de cette somme se détruisent deux à deux.

En appliquant la même notation, c'est-à-dire en désignant par le signe Σ_{32} la somme de 32 expressions semblables, allant de l'indice 0 à l'indice 31 et se rapportant aux 32 quarts, on verra par le même moyen que l'on a les 10 équations suivantes :

$$(\alpha) \quad \left\{ \begin{array}{rr} \Sigma_{32} \sin \zeta = 0 & \Sigma_{32} \cos \zeta = 0 \\ \Sigma_{32} \sin 2\zeta = 0 & \Sigma_{32} \sin \zeta \cos 2\zeta = 0 \\ \Sigma_{32} \cos 2\zeta = 0 & \Sigma_{32} \cos \zeta \sin 2\zeta = 0 \\ \Sigma_{32} \sin \zeta \cos \quad \zeta = 0 & \Sigma_{32} \cos \zeta \cos 2\zeta = 0 \\ \Sigma_{32} \sin \zeta \sin 2\zeta = 0 & \Sigma_{32} \sin 2\zeta \cos 2\zeta = 0. \end{array} \right.$$

Enfin on aura :

$$(\beta) \quad \left\{ \begin{array}{rr} (\gamma) \quad \Sigma_{32} \sin^2 \zeta = 16 & \Sigma_{32} \cos^2 \zeta = 16 \\ \Sigma_{32} \sin^2 2\zeta = 16 & \Sigma_{32} \cos^2 2\zeta = 16. \end{array} \right.$$

La marche à suivre pour démontrer ces quatre dernières égalités est la même pour toutes.

Proposons-nous de démontrer l'équation (γ) : on a :

$$\sin^2\zeta_0 = \sin^2\zeta_{16} = 0 \quad \text{et} \quad \sin^2\zeta_8 = \sin^2\zeta_{24} = 1$$

avec :

$$\sin^2\zeta_4 = \sin^2\zeta_{12} = \frac{1}{2} \quad \sin^2\zeta_{20} = \sin^2\zeta_{28} = \frac{1}{2}.$$

On a également :

$$\sin^2\zeta_5 = \cos^2\zeta_3 \quad \sin^2\zeta_6 = \cos^2\zeta_2 \quad \sin^2\zeta_7 = \cos^2\zeta_1,$$

ce qui pour le premier quadrant nous donne :

$$\sin^2\zeta_0 + \sin^2\zeta_1 + \sin^2\zeta_2 + \sin^2\zeta_3 + \sin^2\zeta_4 + \sin^2\zeta_5 + \sin^2\zeta_6 + \sin^2\zeta_7$$
$$= 0 + \frac{1}{2} + 3.$$

Les autres quadrants donneront : le second, $1 + \frac{1}{2} + 3$;

le troisième, $0 + \frac{1}{2} + 3$;

enfin le quatrième, $1 + \frac{1}{2} + 3$;

donc la somme est égale à 16.

1er CAS. Calcul des coefficients au moyen de 32 déviations.

Supposons que nous ayons de 25 à 30 déviations observées à autant de caps et que ces caps soient distribués à peu près uniformément autour de la rose; nous pourrons nous en servir soit pour établir une table, soit pour tracer une courbe qui nous donnera les déviations du compas aux 32 caps principaux de la rose $\zeta'_0, \zeta'_1 \dots \zeta'_{31}$.

Considérons maintenant les 32 équations qui correspondent aux 32 déviations trouvées aux 32 caps principaux du compas. Nous mettrons toujours pour la symétrie des écritures $\sin\zeta_0$, $\cos\zeta_8$, $\sin\zeta_{16}$, $\cos\zeta_{24}$, bien que chacune de ces quantités soit nulle :

$$F \begin{cases} \delta_0 = A + B\sin\zeta'_0 + C\cos\zeta'_0 + D\sin 2\zeta'_0 + E\cos 2\zeta'_0 \\ \delta_4 = A + . \qquad\qquad\qquad\qquad + E\cos 2\zeta'_4 \\ \\ \delta_{31} = A + B\sin\zeta_{31}. \qquad\qquad + E\cos 2\zeta_{31}. \end{cases}$$

Calcul de A. — Si nous faisons la somme de toutes ces équations membre à membre et que nous tenions compte des relations (α), on verra que l'on a :

$$\delta_0 + \delta_1. \qquad\qquad + \delta_{31} = 32\,A.$$

Pour la commodité du type de calcul que nous voulons donner on écrira cette égalité ainsi :

$$32\,A = (\delta_0 + \delta_{16})$$
$$(\delta_1 + \delta_{17})$$

$$(\delta_{15} + \delta_{31}).$$

Calcul de B. — Multiplions chacune des équations F par le coefficient de B dans cette équation, et faisons ensuite la somme membre à membre des 32 équations ainsi préparées. On aura en tenant compte à la fois des relations (α) et des relations (β) et en désignant pour simplifier les écritures par S_0, S_1,. S_{31} les quantités, sin ζ'_0, sin ζ'_1 sin ζ'_{31}

$$\delta_0\,S_0 + \delta_1\,S_1 + \qquad + \delta_{31}\,S_{31} = 16\,B.$$

Mais si l'on remarque: 1° que $S_{17} = -S_1, S_{18} = -S_2$ et ainsi de suite; 2° qu'on peut pour la symétrie des écritures et sans erreur poser $S_0 = -S_{16}$ —; 3° et enfin, que S_9, S_{10}, S_{15}, peuvent facilement s'exprimer en fonctions de S_1. S_7, on voit que :

$$16\,B = (\delta_0 - \delta_{16})\,S_0$$
$$+ (\delta_1 - \delta_{17})\,S_1$$

$$+ (\delta_8 - \delta_{24})\,S_8$$
$$+ (\delta_9 - \delta_{25})\,S_7$$

$$+ (\delta_{15} - \delta_{31})\,S_1.$$

Calcul de C. — Des opérations toutes semblables nous donneront :

$$16\,C = (\delta_0 - \delta_{16})\,S_8$$

$$+ (\delta_7 - \delta_{23})\,S_1$$
$$- (\delta_8 - \delta_{24})\,S_0$$
$$- (\delta_9 - \delta_{25})\,S_1$$
$$-$$
$$-$$
$$- (\delta_{15} - \delta_{31})\,S_7.$$

Calcul de D. — Pour avoir D il faut multiplier chacune des équations (F) par le coefficient de D dans cette équation et additionner. En remarquant que :

$$\sin 2\,\zeta'_0 = S_0$$
$$\sin 2\,\zeta'_1 = S_2$$

$$\sin 2\,\zeta'_{31} = -S_2.$$

En exprimant les divers sinus en fonction des sinus du premier quadrant seulement, enfin en groupant toutes les déviations qui sont multipliées par les mêmes sinus, on a :

$$16\,D = [(\delta_0 + \delta_{16}) - (\delta_8 + \delta_{24})]\,S_0$$
$$+ [(\delta_1 + \delta_{17}) - (\delta_9 + \delta_{25})]\,S_2$$

$$\text{jusqu'à} + [(\delta_7 + \delta_{23}) - (\delta_{15} + \delta_{31})]\,S_2$$

Les multiplicateurs successifs des 8 polynomes étant respectivement :

$$S_0,\ S_2,\ S_4,\ S_6,\ S_8,\ S_6,\ S_4,\ S_2,$$

Calcul de E. — Un calcul tout à fait analogue au précédent donne :

$$16\,E = [(\delta_0 + \delta_{16}) - (\delta_8 + \delta_{24})]\,S_8$$
$$+$$
$$+$$
$$\text{jusqu'à}\ [(\delta_7 + \delta_{23}) - (\delta_{15} + \delta_{31})]\,S_6$$

Les multiplicateurs successifs des 8 polynomes étant respectivement :

$$S_8,\ S_6,\ S_4,\ S_2,\ S_0,\ -S_2,\ -S_4,\ -S_6.$$

Le groupement même des déviations dans la valeur des divers coefficients nous indique comment nous devons disposer les tables destinées au calcul rapide des cinq inconnues.

Nous diviserons les opérations en deux parties ; dans la première nous calculerons B et C et dans la seconde A, D, E.

La Méthode que nous venons d'exposer pour la résolution d'équations en nombre plus grand que celui des inconnues est générale. On l'appelle « Méthode des moindres carrés » parce que, si on porte dans les équations primitives les valeurs des inconnues déterminées par le système d'équations finales en nombre égal à celui des inconnues, les écarts qui existent alors entre les premiers et les seconds membres des équations données sont tels que la somme de leurs carrés est minima.

TYPE 1.

TABLE A. — *Calcul des coefficients* B et C au moyen des déviations observées aux 32 rumbs principaux et équidistants du compas.

Nom du navire : *Trident.*
Lieu de l'observation : *Greenhithe.*

Date : 23 décembre 1856.

CAP au compas étalon.	I. DÉVIATION correspondante.	CAP au compas étalon.	II. DÉVIATION correspondante.	III. DEMI-SOMME col. I + col. II.	IV. DEMI-DIFFÉRENCE col. I — col. II.	V. CALCUL DE B.		VI. CALCUL C.	
						Multiplicateurs.	PRODUITS de la col. IV par les multiplicat.	Multiplicateurs.	PRODUITS de la col. IV par les multiplicat.
Nord.	— 3° 10′	Sud.	+ 3° 10′	+ 0° 0′	— 3° 10′	$S_0 = 0$	0° 0′	$S_8 = 1$	— 3° 10′
N.q.N E	+ 2 35	S.q.S O.	+ 0 5	+ 1 20	+ 1 15	S_1	+ 0 15	S_7	+ 1 14
N N E.	+ 8 10	S. S O.	— 3 0	+ 2 35	+ 5 35	S_2	+ 2 8	S_6	+ 5 10
N E.q.N.	+ 13 10	S O.q.S.	— 6 30	+ 3 20	+ 9 50	S_3	+ 5 28	S_6	+ 8 11
N E.	+ 16° 50′	S O.	— 9° 40′	+ 3° 35′	+ 13° 15′	S_4	+ 9° 22′	S_4	+ 9° 22′
N E.q.E.	+ 19 30	S O.q.O.	— 13 0	+ 3 15	+ 16 15	S_5	+ 13 31	S_3	+ 9 2
E N E.	+ 20 30	O.S O.	— 16 10	+ 2 10	+ 18 20	S_6	+ 16 56	S_2	+ 7 1
E E.q.E.	+ 21 5	O.q.S O.	— 19 15	+ 0 55	+ 20 10	S_7	+ 19 47	S_1	+ 3 56
Est.	+ 20° 20′	Ouest.	— 21° 10′	— 0° 25′	+ 20° 45′	$S_8 = 1$	+ 20° 45′	$S_0 = 0$	0° 0′
E.q.S E.	+ 19 15	O.q.N O.	— 23 20	— 2 02	+ 21 18	S_7	+ 20 53	$-S_1$	— 4 10
E S E.	+ 18 5	O.N O.	— 24 0	— 2 57	+ 21 3	S_6	+ 19 25	$-S_2$	— 8 3
S E.q.E	+ 16 30	N O.q.O.	— 23 35	— 3 33	+ 20 3	S_5	+ 16 40	$-S_3$	— 11 9
S E.	+ 14° 40′	N O.	— 22° 0	— 3° 40′	+ 18° 20′	S_4	+ 12° 58′	$-S_4$	— 12° 58′
S E q.S.	+ 12 5	N O.q.N.	— 19 00	— 3 47	+ 15 53	S_5	+ 8 49	$-S_5$	— 13 12
S S E.	+ 9 40	N. N O.	— 14 50	— 2 35	+ 12 15	S_2	+ 4 41	$-S_6$	— 11 10
S.q.S E.	+ 6 0	N.q.N O.	— 9 15	— 1 37	+ 7 37	S_1	+ 1 30	$-S_7$	— 7 [illegible]

Σ des + de col. v = + 173° 8′	col. VI.
Σ des — de col. v = 0	Σdes + = + 43°5 [illegible]
Somme totale = 8 B = + 173° 8′	Σdes — = — 71°30′
B = + 21° 38′ $\frac{1}{2}$	Σtotale = 8C = — 27°34′
	C = — 3°27′

NOTES IMPORTANTES.

I. Suivant nos conventions les déviations inscrites avec le signe + sont des déviations est : celles inscrite avec le signe — sont des déviations ouest.

II. La valeur des multiplicateurs S_1, S_2, etc., est donnée dans une table au bout du volume. D'ailleurs, pou abréger les calculs, une autre table donne les produits des arcs de 0° à 33° par ces différents multi plicateurs.

III. On voit pourquoi B et C s'obtiennent finalement en divisant seulement par 8 au lieu de 16. C'est que l col. III et la col. IV renferment, non pas les sommes et les différences qu'elles devraient conten d'après les formules, mais seulement les moitiés de ces quantités. Quoique le calcul soit rendu ain un peu plus délicat, on est forcé de suivre cette marche dès que les sommes ou différences en questic dépassent 33°, afin de pouvoir se servir de la table de multiplication qui abrège considérablement le opérations.

TYPE I.

Table B. *Calcul des coefficients* **A, D, E** au moyen des déviations du compas aux 32 rumbs équidistants principaux.

I. MOITIÉ SUPÉRIEURE. de col. III, table A.	II. MOITIÉ INFÉRIEURE de col. III, table A.	III. DEMI-SOMME col. I + col. II. de cette table.	IV. DEMI-DIFFÉRENCE col. I — col. II. de cette table.	V. CALCUL DE D. Multiplicateurs.	PRODUITS de col. IV par les multiplicateurs.	VI. CALCUL DE E. Multiplicateurs.	PRODUITS de col. IV. par les multiplicateurs.
0° 0′	— 0° 25	— 0° 12′	+ 0° 12′	$S_0 = 0$	0° 0′	$S_8 = 1$	+ 0° 12
+ 1 20	— 2 82	— 0 21	+ 1 41	S_2	+ 0 38	S_6	+ 1 33
+ 2 35	— 2 57	— 0 11	+ 2 46	S_4	+ 1 58	S_4	+ 1 58
+ 3 20	— 3 33	— 0 7	+ 3 26	S_6	+ 3 10	S_2	+ 1 20
+ 3° 35′	— 3° 40′	— 0° 2′	+ 3° 37′	$S_8 = 1$	+ 3° 37′	$S_0 = 0$	+ 0° 0′
+ 3 15	— 3 47	— 0 16	+ 3 31	S_6	+ 3 15	$-S^2$	— 1 20
+ 2 10	— 2 35	— 0 12	+ 2 22	S_4	+ 1 40	$-S_4$	— 1 40
+ 0 55	— 1 37	— 0 21	+ 1 16	S_2	+ 0 30	$-S_6$	— 1 10
Σ des termes + de col. III = 0 — — — = — 1° 42′ Σ totale = 8 A — = — 1° 42′ A = — 0° 13′			Σ des termes + de col. v = + 14° 48′ Σ des termes — de col. v = 0′ Σ totale = 4 D = + 14° 48′ D = + 3° 42′			col. VI. Σ des + = + 5° 03′ Σ des — = — 4° 10′ Σ totale 4 E = + 0° 53′ E = + 0° 13′	

Notes I et II. Comme celles de table A.

III. Les diviseurs de A d'une part, de D et E de l'autre, sont respectivement 8 et 4 au lieu de 32 et 16 comme ils devraient l'être d'après nos formules. Ceci vient de ce que les colonnes I et II ne contiennent que la moitié des quantités qui entrent dans les formules et de ce que les colonnes III et IV ne contiennent encore, l'une que la moitié de la somme col. I + col. II et l'autre que la moitié de la différence col. I et II. On a donc divisé deux fois par 2 c'est-à-dire en somme par 4.

2e cas. — Calcul des coefficients au moyen de 16 déviations.

Supposons qu'on n'ait observé la déviation qu'à 15 à 20 caps du compas distribués sur la rose d'une manière à peu près équidistante. On se servira de ces observations pour établir une table ou tracer une courbe sur l'une desquelles on pourra obtenir les déviations aux 16 rumbs principaux équidistants du compas, ceux que nous avons appelés $\zeta_0, \zeta_2, \zeta_4 \ldots \zeta_{30}$.

En écrivant les 16 équations qui correspondent à ces déviations et en suivant exactement la même marche que précédemment, on obtiendra sans aucune difficulté 16 A, 8 B, 8 C, 8 D, 8 E, comme nous avions obtenu précédemment 32 A, 16 B..... 16 E.

Si on veut avoir le développement de ces valeurs, il est clair qu'il suffit de prendre les équations obtenues dans le premier cas en sautant une ligne de deux en deux, c'est-à-dire, en sautant tout ce qui se rapporte aux déviations d'indice impair que nous ne faisons pas entrer dans le calcul.

Quant aux deux tables qui nous serviront à faire celui-ci, il est bien évident qu'elles sont en tout semblables aux deux précédentes, toujours sous la réserve qu'on sautera dans ces dernières toutes les lignes se rapportant aux déviations d'indice impair.

Afin d'éviter les longueurs, nous ne transcrirons pas de nouveau ces tables en les adaptant au nouveau cas considéré, chacun pouvant le faire sans l'ombre d'une difficulté. La seule différence, c'est que le diviseur final pour A, B, C, sera 4 : et pour D et E, 2 seulement.

3e cas. — Calcul des coefficients au moyen des huit déviations principales

Supposons maintenant que nous n'ayons observé les déviations qu'à 12 ou 15 caps environ du compas, distribués de façon à peu près équidistante sur la circonférence ; comme tout à l'heure, on construira une courbe qui donnera les déviations aux 8 caps principaux du compas N, NE, E, SE, S, SO, O, NO, c'est-à-dire :

$$\zeta'_0,\ \zeta'_4,\ \zeta'_8,\ \zeta_{12},\ \zeta'_{16},\ \zeta'_{20},\ \zeta'_{24},\ \zeta'_{28}.$$

En répétant pour les huit équations que nous avons dans ce cas particulier ce que nous avons dit pour les 32 équations du premier cas, on arrivera à obtenir sans difficulté la valeur de 8 A, 4 B, 4 C, 4 D, 4 E. Le développement de ces valeurs est donné en prenant les valeurs correspondantes du premier cas et en supprimant toutes les lignes qui contiennent des déviations dont l'indice n'est pas 0 ou n'est pas divisible par 4.

Bien que, comme dans le second cas, on n'ait qu'à copier les tables données pour le premier, en supprimant les lignes qui se rapportent aux déviations que l'on n'a pas, nous allons cependant donner le type des deux tables réduites qui conviennent dans ce cas particulier, parce que c'est celui qui se présente le plus fréquemment. Les calculs se font très rapidement et donnent des résultats suffisamment exacts pour la *pratique*.

TYPE II.

TABLE A. *Calcul des coefficients* B et C au moyen des déviations déterminées aux 8 rumbs principaux du compas.

CAP au compas étalon.	I. DÉVIATION correspondante.	CAP au compas étalon.	II. DÉVIATION correspondante.	III. DEMI-SOMME des col. I et II ou $\frac{\text{col I} + \text{col II}}{2}$	IV. DEMI-DIFFÉRENCE des col. I et II ou $\frac{\text{col. I} - \text{col. II}}{2}$	V. CALCUL DE B. Multiplicateurs.	V. CALCUL DE B. PRODUITS de col. IV par les multiplicat.	VI. CALCUL DE C. Multiplicateurs.	VI. CALCUL DE C. PRODUITS de col. IV par les multiplicat.
Nord.	− 3° 10′	Sud.	+ 3° 10′	0° 0′	− 3° 10′	$S_0 = 0$	0° 0′	$S_8 = 1$	− 3° 10′
N E.	+ 16 50	S O.	− 9 40	+ 3 35	+ 13 15	S_4	+ 9 22	S_4	+ 9 22
Est.	+ 20 20	Ouest.	− 21 10	− 0 25	+ 20 45	$S_8 = 1$	+ 20 45	0	+ 0 0
S E.	+ 14 40	N O.	− 22 0	− 3 40	+ 18 20	S_4	+ 12 58	$-S_4$	− 12 58
						col. V		col. VI	
						Σ des termes +	= + 43° 5′	Σ des +	= + 9°22′
						Σ des termes −	= 0° 0′	Σ des −	= −16° 8′
						Somme totale = 2B	= + 43° 5′	Σ totale = 2C	= − 6°46′
							B = + 21° 32′		C = − 3°23′

TYPE II.

TABLE B. *Calcul des coefficients* A, D, E au moyen des déviations déterminées aux 8 rumbs principaux de compas.

I. MOITIÉ SUPÉRIEURE de col. III, table A.	II. MOITIÉ INFÉRIEURE de col. III, table A.	III. CALCUL DE A DEMI-SOMME des col. I et II, table B.	IV. CALCUL DE D ET E. DEMI-DIFFÉRENCE des col. I et II de table B.
0° 0′	− 0° 25′	− 0° 12′	+ 0° 12′ = E
+ 3 35	− 3 40	− 0 2	+ 3 37 = D
Σ des termes + de col. III = 0° 0′			
Σ des termes − de col. III = − 0° 14′			
Σ + ; + Σ − = 2 A. A = − 0° 7			

Calcul de quatre coefficients au moyen de quatre déviations principales. — Toujours en répétant les mêmes raisonnements que dans le premier cas, on établirait aisément les deux types de tables fort simplifiées qui donnent, l'une les quatre coefficients A, B, C et E au moyen des déviations déterminées aux quatre rumbs cardinaux du compas, l'autre les quatre coefficients A, B, C et D, au moyen des déviations déterminées aux quatre rumbs quadrantaux.

D'ailleurs, dans chacun de ces deux derniers cas nous n'avons que quatre observations de déviations, nous n'aurons donc que quatre coefficients sur cinq. Dans le cas des observations faites exactement aux points cardinaux du compas, le calcul nous donnera, A, B, C et E, mais nous n'aurons aucune indication sur la valeur de D qui atteint fréquemment 5 à 7 degrés et va parfois jusqu'à 14 degrés. C'est dire que ces quatre observations seules ne suffiront jamais, à moins qu'on n'ait déterminé D peu de temps auparavant, d'une manière quelconque mais précise.

Quant aux quatre observations faites aux rumbs quadrantaux NE, SE, SO, NO, elles donnent les coefficients A, B, C et D, et, si E a une très petite valeur, comme c'est le cas général, elles sont suffisantes. Mais on ne devra jamais se contenter de ces quatre seules observations, si une détermination antérieure n'a pas montré que le coefficient E était vraiment négligeable.

Tout autre groupement de quatre observations à quatre rumbs équidistants autres que les deux précédents ne nous donne rien, puisque nous avons alors quatre équations seulement, pour déterminer cinq inconnues.

De toutes les méthodes pour déterminer les coefficients, celle d'observer ou d'obtenir avec précision les déviations aux huit rumbs cardinaux et quadrantaux est la plus rapide, et elle est suffisamment exacte, quand les déviations ne dépassent pas 20 degrés, pour que l'on puisse se borner à ces 8 observations, et calculer les autres au moyen des coefficients ainsi déterminés.

Comparaison des valeurs des cinq coefficients obtenues au moyen d'un plus ou moins grand nombre de déviations. — Les deux tables A et B correspondant au cas où l'on détermine les 5 coefficients par les déviations observées ou obtenues aux 32 rumbs principaux du compas nous fournissent d'ailleurs des indications précieuses sur le degré de précision avec lequel on obtient ces coefficients quand on se contente d'un nombre moindre d'observations. Il est légitime d'attribuer aux coefficients déduits de 32 équations la plus grande précision, et de leur comparer tous ceux qu'on obtient autrement, en prenant pour mesure de l'approximation plus ou moins grande de chacun d'eux l'écart plus ou moins grand qui le sépare de sa valeur déduite au moyen des observations à 32 rumbs.

Remarquons qu'il y a huit manières d'obtenir les coefficients

A, B, C par des observations faites à quatre rumbs équidistants suivant que l'on prend pour cap initial ζ_0, ou ζ_1, ou ζ_2 jusqu'à ζ_7 inclusivement. D s'obtient seulement quand les quatre rumbs choisis sont les rumbs quadrantaux, E quand ce sont les rumbs cardinaux.

De même il y a quatre manières d'obtenir les cinq coefficients par des observations faites à huit rumbs équidistants, suivant que le rumb initial est ζ_0, ζ_1, ζ_2, ou ζ_3.

Enfin, il y a deux manières d'obtenir ces coefficients par des observations faites à seize rumbs suivant que le cap initial est ζ_0 ou ζ_1.

Les tables A et B, établies pour le cas de 32 équations, nous permettent d'avoir les valeurs des coefficients correspondant à tous ces cas. Il suffit pour chacun d'eux de ne prendre dans la table que les lignes correspondant aux déviations que l'on emploie. On trouve ainsi, pour les différentes valeurs des coefficients déduites d'un plus ou moins grand nombre d'observations, le tableau suivant :

COEFFICIENT.	4 RUMBS.	8 RUMBS.	16 RUMBS.	32 RUMBS.	COEFFICIENT.	4 RUMBS.	8 RUMBS.	RUMBS.	32 RUMBS.
A	− 0° 12′	− 0° 7′	− 0° 10′	− 0° 13′	C	− 3° 10′	− 3° 23′	− 3° 20′	− 3° 27′
	− 21	− 18	− 16			− 2 56	− 3 33	− 3 25	
	− 11	− 12				− 2 53	− 3 25		
	− 7	− 14				− 2 58	− 3 16		
	− 12					− 3 36			
	− 16					− 4 10			
	− 12					− 4 18			
	− 21					− 3 33			
B	+ 20°45′	+ 21°32′	+ 21°33′	+ 21°38′	D	+ 3° 37′	+ 3° 37′	+ 3° 37′	+ 3° 42′
	+ 21 8	+ 21 44	+ 21 43				+ 3 53	+ 3 47	
	+ 21 33	+ 21 35					+ 3 38		
	+ 22 8	+ 21 42					+ 3 40		
	+ 22 20								
	+ 22 20				E	+ 0° 12′	+ 0° 12′	+ 0° 15′	+ 0° 13′
	+ 21 37						+ 13	+ 11	
	+ 21 17						+ 18		
							+ 10		

Calcul recommandé pour la pratique. — Ce tableau justifie ce que nous avons dit de l'exactitude suffisante des coefficients obtenus au moyen des déviations observées à huit rumbs équidistants. Si, comme c'est le cas général, on ne peut observer exactement aux huit rumbs principaux, il faudra déduire les huit déviations nécessaires d'une courbe qu'on tracera au moyen d'une quinzaine d'observations au moins, réparties le plus uniformément possible autour de la rose.

Exactitude de la Méthode. — Nous venons de comparer les valeurs des cinq coefficients obtenues par différents procédés aux cinq valeurs que nous avons le droit de considérer comme les plus exactes. Il nous reste à nous assurer du degré de confiance que l'on peut accorder à celles-ci, aussi bien que de la légitimité de la méthode générale qui nous les a fournies. Pour cela, il convient évidemment de prendre ces cinq coefficients, de calculer avec ces cinq valeurs la déviation à chacun des caps principaux au moyen de la formule (12) et de comparer ces déviations calculées aux déviations observées correspondantes.

M. Faye, dans son *Cours d'astronomie nautique*, a fait cette comparaison pour les déviations du *Trident*, que nous avons empruntées au *Manuel de l'Amirauté anglaise*, où elles ont servi de type et de première application aux méthodes élégantes et sûres de MM. Archibald Smith et Evans.

En mettant en regard les déviations calculées et les déviations observées correspondant à un même cap, et en formant la différence, il a constaté que les différences étaient toujours comprises entre 0 et 64 minutes. En examinant l'ensemble de ces différences, il a trouvé de plus qu'elles suivaient une loi régulière, restaient de même signe dans un secteur de 60 degrés et s'annulaient en changeant de signe six fois tandis que le cap du navire faisait le tour entier de la rose. Nous avons donc affaire à une erreur sextantale. Elle tenait fort probablement à la longueur des aiguilles aimantées de la rose; pour tenir compte de cette erreur, nous aurions dû prendre dans la formule les termes qui y correspondent

$$F \sin 3\zeta' + G \cos 3\zeta'.$$

M. Faye a déterminé ces deux nouveaux coefficients; puis, en les joignant aux cinq autres déjà obtenus, il a calculé de nouveau les déviations. Les différences de ces nouvelles déviations avec les déviations observées sont insignifiantes, et n'affectent aucune allure systématique. En examinant ces derniers résidus, M. Faye a trouvé que l'erreur problable d'une des observations du *Trident* est d'environ 15 minutes. Pour des observations semblables, c'est un très haut degré de précision qui semble même devoir être très rarement atteint.

Nous renvoyons les lecteurs désireux d'avoir des idées précises sur ces notions d'erreur probable, d'erreur moyenne qui jouent un si grand rôle dans toutes les discussions des observations, à la Théorie des erreurs à la fois si simple et si élégante que M. Faye a présentée en quelques pages dans son cours d'Astronomie nautique.

En résumé, on voit que pour les déviations du *Trident* dont la plus forte en valeur absolue est de 24 degrés, même lorsqu'on ne tient pas compte de l'erreur sextantale et des coefficients qui lui correspondent, l'écart maximum entre le calcul et l'observation est de 64 minutes, erreur acceptable dans la pratique où il est difficile de compter sur une plus grande approximation.

Quand donc au premier armement du navire nous aurons calculé les cinq coefficients par une méthode quelconque, il conviendra de s'assurer de la valeur des observations faites et de l'exactitude des calculs, en calculant ensuite quelques-unes des déviations observées au moyen des coefficients et en comparant les valeurs calculées aux valeurs observées ; l'écart ne devra jamais être notablement plus grand que 1 degré ; s'il dépasse 2 degrés, ce sera un avertissement d'avoir soit à recommencer les observations, soit à surveiller attentivement le compas, si on n'a pas le temps de faire une nouvelle série de déterminations.

CHAPITRE VI

SIMPLIFICATION DU PROBLÈME
TROIS COEFFICIENTS SONT CONSTANTS
ET DEUX SEULEMENT VARIABLES

Nous avons déjà ramené la connaissance de la déviation à tous les caps à la détermination de cinq coefficients que nous avons appris à calculer; mais le problème est susceptible d'une plus grande simplification encore. En effet, parmi ces cinq coefficients, trois, A, D, E, sont constants dès que le magnétisme du bâtiment a atteint un état voisin de son état d'équilibre, ce dont on est averti dès que deux calculs successifs des cinq coefficients effectués à deux endroits différents et à deux dates assez éloignées l'une de l'autre donnent pour ces trois coefficients des valeurs qui ne diffèrent respectivement que de quantités comparables aux erreurs d'observation. Et, avec les moyens d'observation dont on dispose à bord, il ne faut pas compter, en apportant le plus grand soin et dans les circonstances les plus favorables, avoir des erreurs moindres que 20 à 30 minutes d'arc.

Une fois cette condition remplie, et tant que la place du compas étalon, comme les pièces de fer du navire qui l'avoisinent, resteront les mêmes, on saura que si le navire se déplace, deux coefficients seuls B et C varient, et, par suite, deux observations suffiront à donner les deux équations qui permettront de les calculer.

Mais, quand l'état magnétique du navire est encore dans un état de fluctuation considérable, il suffira pour éviter tout mécompte de faire une troisième observation, qui permettra de calculer le coefficient D, dont les variations incomparablement inférieures à celles de C, et surtout de B, pourraient cependant, au moins dans la première année de service du bâtiment, atteindre des valeurs sensibles. Quant aux coefficients A et E, nous avons montré dans la première partie que le dernier est fréquemment négligeable et que, dans tous les cas, les variations de l'un et de l'autre sont assez faibles pour pouvoir être négligées. On prendra donc pour ces deux coefficients les valeurs trouvées dans le port, avant le départ.

Pour déterminer les trois autres coefficients, nous nous servirons toujours des observations de variation faites aux caps cardinaux ou quadrantaux du compas à cause de la forme très simple que prennent alors les équations correspondantes, que nous transcrivons ici :

$$
(35)\quad \left\{\begin{array}{lllll}
(1) & \text{Cap au Nord} & \delta_0 = A & + C & + E \\
(2) & \text{Cap au Nord-Est} & \delta_4 = A + 0,7\,(B + C) + D & & \\
(3) & \text{Cap à l'Est} & \delta_8 = A + B & & - E \\
 & \text{Cap au Sud-Est} & \delta_{12} = A + 0,7\,(B - C) - D & & \\
 & \text{Cap au Sud} & \delta_{16} = A & - C & + E \\
 & \text{Cap au Sud-Ouest} & \delta_{20} = A - 0,7\,(B + C) + D & & \\
 & \text{Cap à l'Ouest} & \delta_{24} = A - B & & - E \\
 & \text{Cap au Nord-Ouest} & \delta_{28} = A - 0,7\,(B - C) - D & &
\end{array}\right.
$$

Détermination à la mer des trois coefficients B, C, D par trois observations faites dans un même quadrant. — Un quart d'heure suffira à bord d'un navire à vapeur pour faire les trois observations nécessaires. On observera la variation aux deux caps cardinaux qui comprennent la route du bâtiment, et au cap quadrantal intermédiaire, on en déduira les déviations et on prendra les 3 équations qui correspondent respectivement à chacune de ces déviations. Supposons que la route faite par le navire soit le N 70 E; on observera la variation aux caps Nord, Nord-Est et Est du compas et on formera les équations (1), (2), (3), du tableau précédent.

L'équation (1) donnera $C = \delta_0 - (A + E)$
L'équation (3) donnera $B = \delta_8 - (A - E)$

Enfin, B et (C) étant calculés, l'équation (2) donne

$$D = \delta_4 - A - 0,7\,(B + C).$$

B et C sont donnés par les deux premières équations avec les signes qui les affectent, et ce sont ces quantités affectées de leurs signes qu'il faut mettre dans l'équation (3).

Exemple : si on a, $A = -1^\circ 30'$ $E = +0^\circ 15'$
avec $\delta_0 = +3^\circ 20'$ $\delta_4 = +4^\circ 20'$ $\delta_8 = -9^\circ 40'$.

Les formules précédentes donnent :

$$C = +4^\circ 35' \quad B = -7^\circ 55'$$

$$\text{puis } D = +4^\circ 20' - (-1^\circ 30') - 0,7\,(-7^\circ 55' + 4^\circ 35')$$
$$= +4^\circ 20' + 1^\circ 30' + 0,7 \times 3^\circ 20' = +8^\circ 05'.$$

Détermination à la mer des deux coefficients B et C. — Quand il suffira d'obtenir les deux coefficients B et C, deux équations seules seront nécessaires, et on les obtiendra en observant la variation aux deux caps cardinaux qui sont les plus voisins de la route du bâtiment. De la variation on passera à la déviation au moyen de la déclinaison donnée par les tables, et on formera les équations. Ce cas n'offre aucune difficulté.

Avec les deux ou trois coefficients déterminés par l'observation directe, et les deux coefficients supposés connus, on sera en mesure de calculer une nouvelle table, donnant les déviations correspondant aux 16 ou 32 caps principaux du compas pour le cas où le navire est droit, et qui permettra par conséquent de faire avec sécurité les changements de route nécessaires pour arriver au mouillage. Si le navire donnait fortement à la bande, il faudrait apporter à chacune des déviations ainsi calculées une correction variable avec le cap, et que nous donnons plus loin le moyen d'obtenir.

Calcul des déviations au moyen des cinq coefficients A, B, C, D, E. — La manière la plus commode de disposer les calculs est indiquée dans la table C, type III, où l'on a calculé les déviations du compas étalon du *Trident* pour les 16 rumbs principaux de la rose.

On met à profit, pour calculer rapidement cette table, la forme particulière de l'équation de la déviation, que nous écrirons de la façon suivante :

$$\delta = A + D \sin 2\zeta' + E \cos 2\zeta' + B \sin \zeta' + C \cos \zeta'$$

On voit que, quand on a effectué les calculs nécessaires pour les huit valeurs de ζ', allant de deux en deux, de ζ'_0 à ζ'_{14}, qui se trouvent dans le premier demi-cercle, les calculs se simplifient notablement, car l'ensemble des trois premiers termes reprend pour les huit autres valeurs de ζ', exactement les mêmes valeurs avec le même signe, et, quant à l'ensemble des deux derniers, il reprend les mêmes valeurs, mais changées de signes. Cela dit, la table suivante n'exige aucune explication.

TYPE III.

Table C donnant les déviations aux seize caps principaux au moyen des coefficients A, B, C, D, E.

Nom du navire : *Trident.*

Lieu et date de l'observation : *Greenhithe.* 23 *décembre* 1856.

I. A = Déviation constante.	II. D = + 3° 42′ Multiplicateurs.	II. PRODUITS de D par les multiplicat.	III. E = + 13′ Multiplicateurs.	III. PRODUITS de E par les multiplicat.	IV. SOMME des col. II et III. — Déviation quadrantale.	V. SOMME des col. I et IV. — Déviations constante et quadrantale.	Multiplicateurs.	VI. B = + 21° 40′ PRODUITS de B par les multiplicat.	Multiplicateurs.	VII. C = — 3° 27′ PRODUITS de C par les multiplicat.	VIII. SOMME des col. VI et VII. — Déviation semi-circulaire.	CAP du navire au compas étalon.	IX. SOMME des col V et VIII. — Déviation calculée du compas étalon.
— 0° 13′	0	0° 0′	1	+ 0° 13′	+ 0° 13′	0° 0′	0	0° 0′	1	— 3° 27′	— 3° 27′	Nord.	— 3° 27′
	S_4	+ 2 37	S_4	+ 0 9	+ 2 46	+ 2 33	S_2	+ 8 18	S_6	— 3 10	+ 5 8	N. N E.	+ 7 41
	1	+ 3 42	0	— 0 0	+ 3 42	+ 3 29	S_4	+ 15 19	S_4	— 2 27	+ 12 52	N E.	+ 16 21
	S_4	+ 2 37	— S_4	— 0 9	+ 2 28	+ 2 15	S_6	+ 20 1	S_2	— 1 20	+ 18 41	E. N E.	+ 20 56
	0	0° 0	— 1	— 0° 13′	— 0° 13′	— 0° 26′	1	+ 21° 40′	0	0° 0′	+ 21° 40′	Est.	+ 21° 14′
	— S_4	— 2 37	— S_4	— 0 9	— 2 46	— 2 59	S_6	+ 20 1	— S_2	+ 1 20	+ 22 21	E. S E.	+ 19 22
	— 1	— 3 42	0	0 0	— 3 42	— 3 55	S_4	+ 15 19	— S_4	+ 2 27	+ 17 46	S E.	+ 13 51
	— S_4	— 2 37	S_4	+ 0 9	— 2 28	— 2 41	S_2	+ 8 18	— S_6	+ 3 10	+ 11 28	S. S E.	+ 8 47
Répéter la partie supérieure de la col. V dans la partie inférieure.						0° 0′	Répéter la partie supérieure de la colonne VIII dans la partie inférieure en changeant les signes.				+ 3° 27′	Sud.	+ 3° 27′
						+ 2 33					— 5 8	S. S O.	— 2 35
						+ 3 29					— 12 52	S O.	— 9 23
						+ 2 15					— 18 41	O. S O.	— 16 26
						— 0° 26′					— 21° 40′	Ouest.	— 22° 6′
						— 2 59					— 22 21	O. N O.	— 25 20
						— 3 55					— 17 46	N O.	— 21 41
						— 2 41					— 11 28	N. N O.	— 14 9

N. B. On peut se dispenser de ces calculs en se bornant à calculer, au moyen des formules très simples données plus haut, page (140), les déviations aux huit caps principaux. On construit alors à l'aide de ces huit quantités une courbe des déviations sur laquelle une simple mesure donne la déviation à la route que l'on veut faire. On trouvera dans la troisième partie page (166) une autre méthode graphique encore plus expéditive pour résoudre la même question. Voyez surtout à la fin du livre la méthode graphique de l'abaque hexagonal.

Remarque importante. — Comme les coefficients A, D, E sont constants, les cinq premières colonnes de la table C ne changent pas : il suffit donc, quand on veut obtenir la nouvelle table de déviations qui correspond à une nouvelle position du bâtiment, de calculer pour les 16 rumbs principaux, la somme :

$$B \sin \zeta + C \cos \zeta',$$

avec les nouvelles valeurs de B et C qu'on aura trouvées.

Ce calcul s'effectue rapidement au moyen de la table auxiliaire placée à la fin du volume.

Appareil du docteur Paugger. — Le docteur F. Paugger, directeur de l'École supérieure de navigation à Trieste, a fait construire en 1876 un appareil nommé « Dromoscope » qui effectue lui-même ces calculs et dont voici le principe essentiel. Deux aiguilles, se mouvant sur un cercle divisé, sont reliées par un système d'axes et de roues mobiles, dont les positions relatives sont déterminées par les valeurs des différents coefficients. A chacun de ceux-ci correspond une échelle divisée et séparée ; en fixant l'index de chaque coefficient sur la valeur de ce dernier, pour le compas donné, la liaison des deux aiguilles est telle que si l'on met l'une d'elles sur la route au compas, l'autre indique la route vraie et réciproquement. En 1885, M. le commandant Fournier a fait construire un instrument analogue à Paris, chez l'ingénieur Bréguet.

Déterminer la déclinaison à bord, soit en rade, soit à la mer. — Ordinairement, les cartes marines contiennent les courbes de déclinaison ou un nombre assez grand de valeurs de cette quantité pour qu'on puisse l'obtenir avec une exactitude suffisante pour la pratique. Si cependant, pour une cause ou pour une autre, on n'avait pas ce moyen rapide de la déterminer, l'équation générale (29)[1] que nous mettrons sous la forme :

$$\text{Déclinaison} = \text{Variation} - \text{Déviation},$$

nous montre que, toutes les fois qu'on aura observé une variation, on en pourra conclure la déclinaison, si, par les formules précédentes, nous connaissons la déviation au cap de navire indiqué par le compas.

Or, nous avons cette déviation toutes les fois que nous connaissons les cinq coefficients qui entrent dans la formule (12)[2], pourvu que les déviations soient inférieures à 20 degrés. Mais on comprend que, pour éviter le long calcul des cinq termes de la formule,

1. Page 105.
2. Page 65.

on préfère choisir les caps au compas de façon à abréger les opérations; on prend ordinairement un des caps cardinaux.

En se reportant aux équations (35)[1], on verra qu'il entre toujours dans la déviation à un cap cardinal, soit le coefficient B, soit le coefficient C; ce sont les coefficients les plus irréguliers et les plus variables de la formule (12). Si, pour une raison quelconque, on doutait de l'exactitude de leurs valeurs, pour le lieu où l'on se trouve, rien ne serait plus aisé que de s'en passer. Il suffirait pour cela d'observer, non plus à un seul cap cardinal, mais à deux d'entre eux diamétralement opposés. Prenons, par exemple, le Nord et le Sud, appelons x l'azimut magnétique exact inconnu de l'objet ou de l'astre que nous relevons, b_0 et b_{16}, les deux relèvements au compas aux deux caps donnés, δ_0, δ_{16} les deux déviations inconnues à ces deux caps, on aura évidemment d'après l'équation (32)[2] :

$$(\alpha)\quad \left\{\begin{aligned} x &= b_0 + \delta_0 \\ x &= b_{16} + \delta_{16} \end{aligned}\right. \quad \text{ou } 2x = b_0 + b_{16} + \delta_0 + \delta_{16} = b_0 + b_{16} + 2(A + E),$$

qui nous donne l'azimut magnétique x, en fonction des azimuts au compas observés et des coefficients constants A et E, que l'on doit déterminer avec une grande exactitude avant le départ. Ayant l'azimut vrai de l'astre ou de l'objet et son azimut magnétique, leur différence donnera la déclinaison cherchée.

Enfin, en admettant qu'on ait un compas dont les déviations soient si considérables qu'on ne puisse leur appliquer la formule simplifiée (12), il est facile de voir qu'il suffit de relever l'astre ou l'objet successivement à quatre caps équidistants sur la rose et séparés par 90 degrés pour obtenir la déclinaison sans l'aide d'aucun autre coefficient que A. Prenons les notations précédentes, et supposons, pour plus de simplicité, que les quatre caps choisis soient les quatre caps cardinaux. Nous aurons, en additionnant les équations semblables à (α) que nous donne chaque relèvement à un cap cardinal :

$$4x = b_0 + b_8 + b_{16} + b_{24} + \delta_0 + \delta_8 + \delta_{16} + \delta_{24}.$$

Or, puisque la déviation du compas est un phénomène périodique, l'équation générale (11) de la première partie s'y applique et montre que la somme des quatre déviations inconnues qui entrent dans la formule est précisément égale à 4 A, et on doit toujours avoir déterminé ce coefficient avant le départ.

1. P. 140.
2. P. 107.

Du relèvement magnétique, on passe, comme nous l'avons dit, à la déclinaison, et l'on voit ainsi que, dans le cas le plus général, quatre relèvements du même astre ou du même objet pris à des caps équidistants de 90 degrés suffisent pour obtenir cette quantité.

CHAPITRE VII

DÉTERMINATION PRATIQUE, EN FAISANT INCLINER LE NAVIRE, DU COEFFICIENT DU A LA BANDE

Influence de la déviation due à la bande. — Nous avons donné dans la première partie, formule (24), l'expression qui lie les deux déviations au même cap du compas, et déterminées, l'une quand le bâtiment est droit, l'autre quand il est incliné d'un angle i, que l'on compte positivement ou négativement dans les calculs suivant que le navire est incliné sur tribord ou sur bâbord.

En général les paramètres c et g sont très petits; on peut dès lors négliger les termes qui les contiennent et écrire avec une exactitude suffisante pour la pratique :

$$\delta_i = \delta + J\, i \cos \zeta'.$$

Connaissant δ par les calculs précédents, ζ' par le compas, i par l'oscillomètre du bord, on voit qu'il suffit, pour obtenir δ_i d'avoir la valeur de J qu'on appelle le coefficient dû à la bande. La théorie permet de déterminer ce coefficient, sans même faire incliner le bâtiment, mais on doit alors avoir à sa disposition une aiguille aimantée disposée de manière à pouvoir faire des observations de rapport d'intensités de forces magnétiques verticales.

Détermination de J en faisant incliner le navire. — Quand on n'est pas muni de l'appareil précédent, on peut obtenir J en faisant incliner le navire d'un angle i, on amène alors le cap sur la division du compas ζ' qu'il occupait quand le navire était droit et la formule précédente donne :

$$J = \frac{\delta_i - \delta}{i \times \cos \zeta'}.$$

La différence $\delta_i - \delta$ est d'autant plus sensible que l'angle i est plus grand, il convient donc que l'angle de bande soit de 6 à 8 degrés; s'il est trop difficile de lui faire atteindre cette valeur, on se borne à incliner successivement le navire de 4 degrés sur tribord puis sur bâbord, ce qui est relativement toujours aisé; on a alors, en appelant δ_t et δ_b les deux déviations observées, si l'angle de bande est le même sur bâbord et sur tribord :

$$J = \frac{\delta_t - \delta_b}{2\, i \cos \zeta'},$$

où :

$$J = \frac{1}{2 \cos \zeta'} \left[\frac{\delta_t - \delta}{i_1} - \frac{\delta_b - \delta}{i_2} \right],$$

i_1 et i_2 étant les deux angles d'inclinaison sur tribord et sur bâbord. Nous avons tenu comple du signe de i_2 pour écrire cette formule; il faudra donc remplacer simplement i_2 par sa valeur en degrés prise positivement.

Sur tout navire donnant facilement à la mer une bande de 7 à 8 degrés, il convient de calculer avec soin le coefficient J, et de préparer, suivant le conseil et l'exemple donnés par M. Gelgich, Directeur de l'École de navigation de Cattaro, une table qui donne à simple lecture la valeur de $J\, i \cos \zeta'$ pour les caps principaux du compas, et différentes valeurs de l'angle i.

M. Gelgich dispose cette table de la manière suivante :

J =

$+i$	N.	N.q.NE.	NNE.			ENE.	E.q.NE.	E.
	S.	S.q.SE.	SSE.			ESE.	E.q.SE.	E.
2°		.	.	.	.		.	. .
4°	.		.	.	.		.	. .
.	.		.	. .	. .	.	.	. .
.	.		.	. .	. .	.	.	. .
16°					.	. .	.	. .
$+i$	N.	N.q.NO.	NNO.	.	.	ONO.	O.q.NO.	O.
	S.	S.q.SO.	SSO.	.	.	OSO.	O.q.SO.	O.

Pour former cette table, on calcule d'abord J, on suppose que i est un angle de bande donné sur tribord, c'est-à-dire positif, et on effectue le produit $J\, i$. Pour former aisément les produits $J\, i \cos \zeta'$ correspondant aux divers caps, on remplacera ζ' par l'angle complémentaire ζ_1, et la table auxiliaire de la fin du volume donnera par une simple lecture les produits $J\, i \sin \zeta_1$; on forme ainsi les lignes horizontales qui correspondent aux diverses valeurs de i et de ζ'. Mais il ne faut pas oublier que les nombres inscrits dans la table, avec le signe qui les accompagne, sont les corrections qui correspondent à un angle de bande positif, et à un cap intermédiaire entre le Nord et l'Est.

Si on veut la correction qui correspond à un autre cap, il faudra bien faire attention au signe de cos ζ', et, comme il est négatif pour tous les caps compris entre l'Est et l'Ouest en passant par le Sud, il faudra pour tous ces caps changer de signe la correction trouvée dans la table.

Enfin, si le navire s'incline sur bâbord, i est négatif, et il faut de ce fait changer de signe tous les nombres inscrits dans la table, puis, cela fait, il faudra de même que dans le cas précédent, voir si cos ζ' est positif ou négatif, pour savoir si finalement la correction conserve ce signe ainsi modifié, ou si elle reprend par un second changement de signe, dû cette fois à ζ', le signe qu'elle avait dans le premier tableau.

Pour se servir de cette table, on y entre avec la valeur de i et on suit la ligne horizontale correspondante, jusqu'à ce qu'on arrive au nombre qui se trouve dans la colonne verticale, ayant en tête le cap du bâtiment. Quand le cap ni le degré de bande ne se trouvent exactement dans la table, on interpole à la manière ordinaire.

Il est essentiel de ne pas négliger de faire cette correction. C'est de là que proviennent souvent des erreurs d'estime considérables qu'on attribue alors soit à des courants, soit à des déviations irrégulières.

Importance du coefficient de bande. — Pour des navires cuirassés et même pour des navires sans cuirasse, mais construits en fer, il n'est pas rare de voir ce coefficient atteindre 0, 5 et 0, 6 même pour des compas bien placés. Si $J = 0,5$ par exemple, 10 degrés de bande donneront, quand le navire fera route au Nord, une erreur de près d'un demi-quart, qui pour 150 milles parcourus correspond à une erreur d'estime de près de 15 milles.

Quelquefois, ce coefficient atteint des valeurs de 0, 8; 1 et même 1, 5; son importance s'accroît d'autant, et il devient alors dangereux de le négliger dans les calculs, si on navigue à l'estime.

Il est essentiel de se rappeler que ce coefficient change avec la position géographique du navire et qu'il faut, par conséquent, dans les premiers voyages du navire surtout, saisir toutes les occasions possibles de le déterminer dans divers parages.

CONCLUSION

Importance des coefficients. — Quand un navire est neuf et finit son armement, on peut avoir, avant qu'il sorte du port, des renseignements précieux sur la convenance plus ou moins grande de la place choisie pour les compas.

En effet, pour un compas dont l'axe est bien placé dans le plan médian du navire, les coefficients A et E sont négligeables. En déterminant B, C, D par trois observations de déviation, faites comme nous l'avons indiqué dans un quadrant, on pourra construire une table de déviations approximatives, et savoir si la déviation *maxima* dépasse ou non 20° et, par suite, s'il faut ou non changer le compas de place.

En rade, avant l'opération de la régulation, on pourra renouveler les mêmes observations. On ne doit pas manquer de faire, à chacun des caps où l'on prend la déviation, l'observation donnant la valeur du rapport de H' à H correspondant à ce cap.

Quand un bâtiment est lancé depuis plus d'un an et a déjà navigué, on connaît la valeur des coefficients A, E, D et de la quantité λ; par suite, à un cap donné quelconque, il suffit d'observer d'une part la déviation, d'autre part le rapport de H' à H, pour pourvoir au moyen des équations (44) et (45) calculer les coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, d'où l'on concluera B et C.

On a ainsi toutes les données nécessaires, soit pour calculer une table complète de déviations, soit pour faire, dès le bassin, ou dans le port, une compensation très approchée du compas.

Nota. — Voir à la fin du livre une méthode graphique imaginée par M. Lallemand, ingénieur au corps des mines, pour la détermination rapide des valeurs de la déviation en un lieu et à un cap quelconques.

FIN DE LA DEUXIÈME PARTIE

TROISIEME PARTIE

EXPRESSION DES FORCES MAGNÉTIQUES QUI AGISSENT A BORD

LEURS RELATIONS AVEC LES COEFFICIENTS EXACTS. MÉTHODE GRAPHIQUE POUR TROUVER LA DÉVIATION ET LA FORCE DIRECTRICE DU COMPAS

INTRODUCTION

Dans la première partie, nous avons donné l'expression des composantes, vers le Nord et vers l'Est magnétiques, de la force horizontale magnétique, H', que l'action combinée de la terre et du navire exerce sur le pôle Nord ou rouge de l'aiguille aimantée. Nous allons donner maintenant l'expression des composantes de la force magnétique, non plus horizontale mais totale, suivant trois axes invariablement liés aux navires.

Ces expressions nous permettront de trouver aisément les coefficients exacts et la quantité λ en fonction des valeurs que prend le rapport de H' à H quand le cap du navire parcourt la rose entière. Nous donnerons ensuite les formules qui permettent, soit de passer des valeurs des coefficients exacts à celles des coefficients approchés, soit de résoudre le problème inverse.

Nous montrerons enfin comment la connaissance des cinq coefficients exacts et de la quantité λ permet de construire, en quelques minutes, une courbe dite dygogramme, qu'il y aurait grand intérêt à tracer toutes les fois qu'on emploie un compas non compensé, car elle donne à la fois, pour un cap magnétique quelconque, la déviation et la force directrice de l'aiguille aimantée, correspondantes à ce cap, ce qui permet de savoir exactement à quels caps on doit craindre la paresse du compas. Aujourd'hui, cette courbe est très peu employée parce qu'on croit à tort qu'elle est longue et difficile à tracer.

Ceux qui voudront bien prendre la peine de lire le chapitre qui lui est consacré reconnaîtront aisément que le capitaine de vaisseau Colongue, de la marine impériale russe, a amené la construction du dygogramme à un degré de simplicité et d'élégance tel qu'il peut être tracé en moins de dix minutes.

Les expressions des trois nouvelles composantes dans lesquelles nous décomposons la force directrice *totale,* de l'aiguille à bord, permettent également d'étudier en détail l'erreur due à la bande, de calculer son principal coefficient sans faire incliner le navire et, enfin, de savoir exactement si on peut à bon droit négliger deux termes correctifs dont, ordinairement, on ne tient aucun compte sans s'assurer que cette approximation est permise.

Ces relations et ces formules ne sont donc pas de purs exercices de calcul. Elles seules permettent de déterminer exactement et rapidement ce qu'on peut attendre d'un compas dans la pratique, et de surmonter toutes les difficultés qui peuvent se présenter dans des cas d'installation tout à fait exceptionnels du compas.

Des coefficients exacts. — Nous avons donné, dans la première partie [équations (6)], les expressions des coefficients $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$, en fonction de quantités que nous ne savons pas, dans l'état actuel de nos connaissances, déterminer *à priori.* Ces expressions sont donc purement théoriques et ne nous donnent pas le moyen de calculer ces coefficients exacts, dont l'importance est évidente puisque ce sont eux, et non les coefficients dits approchés, qui s'introduisent naturellement dans la question et qui sont liés directement aux forces magnétiques de diverses provenances qui s'exercent à bord.

On arrive à cette détermination des coefficients exacts de deux manières bien différentes.

La première, qui est la plus usitée dans la pratique et qui donne une approximation bien suffisante, est une méthode indirecte; elle consiste à déterminer les coefficients exacts au moyen des valeurs des coefficients approchés, valeurs que nous avons appris à calculer dans la deuxième partie.

Nous pourrions donc, s'il s'agissait du simple calcul des coefficients exacts, nous en tenir aux données que nous possédons déjà, en y joignant les relations qui lient les deux espèces de coefficients.

Il est cependant indispensable de donner la seconde méthode qui est directe et fondée sur la possibilité d'obtenir aisément le rapport des intensités des forces magnétiques, parce qu'elle fait mieux comprendre les relations étroites qui existent entre les coefficients et le magnétisme du navire et qu'elle met en évidence le coefficient λ défini plus haut.

CHAPITRE PREMIER

Diverses expressions des forces magnétiques qui agissent à bord.— Nous allons former les expressions des composantes vers l'avant du bâtiment et vers tribord de la force magnétique qui s'exerce à bord sur le pôle de l'extrémité Nord de l'aiguille aimantée.

Nous décomposerons cette force suivant les trois axes rectangulaires *ox, oy, oz* dont nous avons fixé la direction dans la première partie, page (54).

Nous pourrions aisément former l'expression des deux premières composantes à l'aide des formules contenues dans la première partie.

Les formules (8) et (9) nous donnent, en effet, l'expression des composantes, vers le Nord et l'Est magnétiques, de la force qui oriente le compas.

Si nous voulons passer de ces composantes à celles qui sont dirigées vers l'avant et vers tribord du navire, il nous faudra former les expressions :

$$\frac{H'}{\lambda H}\cos\zeta' \text{ et } \frac{H'}{\lambda H}\sin\zeta', \quad \text{or } \delta = \zeta - \zeta' \text{ donc } \zeta' = \zeta - \delta,$$

et par suite :

$$\cos\zeta' = \cos\delta\cos\zeta + \sin\delta\sin\zeta,$$
$$\sin\zeta' = \cos\zeta\sin\delta - \sin\zeta\cos\delta.$$

Il faudra donc multiplier les deux termes de l'équation (8) par $\cos\zeta$, les deux termes de l'équation (9) par $\sin\zeta$, et ajouter pour avoir $\frac{H'}{\lambda H}\cos\zeta'$; et de même, multiplier les deux termes de l'équation (9) par $\cos\zeta$, puis les deux termes de l'équation (8) par $-\sin\zeta$, et ajouter pour avoir $\frac{H'}{\lambda H}\sin\zeta'$.

On peut également trouver ces deux quantités sans calcul par une marche directe, qui n'offre aucune difficulté au point où nous en sommes, et qui a le double avantage de donner aux deux composantes cherchées la forme sous laquelle on les emploie habituellement et de donner en même temps la composante dirigée suivant *oz* dont nous aurons besoin dans la suite.

Nous supposons toujours que l'aiguille ou les aiguilles du compas sont assez petites, les pièces de fer du navire qui agissent sur elles assez éloignées, pour que toutes les actions magnétiques auxquelles l'aiguille est soumise puissent être assimilées à des couples dont les deux forces égales, parallèles et opposées, seront appliquées chacune à l'un des deux pôles de l'aiguille.

Ne considérons que le pôle situé à l'extrémité Nord de l'aiguille.

Les forces magnétiques qui agissent en ce point sont au nombre de trois :

1° La force magnétique de la terre;

2° La force magnétique résultant du magnétisme sous-permanent du navire;

3° La force magnétique qui provient de l'action de la force terrestre sur le fer doux du navire.

Décomposons chacune de ces trois forces suivant les trois axes choisis :

et soient X, Y, Z, les composantes de la première force,
P, Q, R, les composantes de la seconde.

Quant aux expressions des composantes de la troisième force, on les obtient en considérant séparément l'action de chacune des composantes terrestres sur le fer doux.

La composante X, par exemple, agissant sur une molécule de fer doux, y développera une force magnétique de grandeur t X, de direction déterminée et qui, décomposée suivant les trois axes, donnera respectivement les composantes m X, n X, p X.

Si nous faisons la somme de toutes ces composantes pour toutes les molécules du fer doux du navire, nous verrons que la composante X de la force magnétique terrestre développe, dans le fer doux du navire, une force magnétique dont les composantes, suivant les trois axes, peuvent être représentées respectivement par a X, d X, g X.

Un raisonnement tout semblable nous montrera que les composantes de la force magnétique induite sous l'action de Y seront respectivement: b Y, e Y, h Y, et enfin que les composantes de la force magnétique induite par Z seront respectivement : c Z, f Z et k Z.

Et il est évident qu'on peut regarder chacune de ces neuf composantes comme émanée de l'une des neuf tiges de fer doux dont nous avons parlé dans la première partie et dont la planche II indique les positions diverses, variables avec le signe du paramètre que chacune d'elles introduit. Ce signe est positif quand l'action exercée par la tige qui le représente, sur le pôle n de l'aiguille aimantée, est dirigée suivant la direction même de l'un des axes *ox*, *oy*, *oz*; et négatif, quand le magnétisme de cette tige donne naissance à une force dirigée suivant *ox'*, *oy'*, *oz'*, c'est-à-dire suivant les directions opposées à nos trois axes.

On voit bien pourquoi le signe de chaque coefficient ne dépend pas explicitement du cap du bâtiment, c'est que d'abord les axes eux-mêmes sont liés invariablement au bâtiment et qu'ensuite nous avons affaire à du fer doux dans lequel l'orientation des pôles dépend de la direction du cap. Il s'ensuit que, quand l'axe *ox* a décrit un angle de 180 degrés, par exemple, l'orientation des pôles de la tige horizontale a changé également de façon que ce double changement, dans la direction de l'axe et dans la polarisation de la tige, laisse le même signe au paramètre introduit par cette dernière.

Par conséquent, si nous appelons X', Y', Z', les composantes suivant les axes désignés de la force que nous avons appelée H' nous aurons :

$$(36)\qquad \left\{\begin{aligned} X' &= X + aX + bY + cZ + P \\ Y' &= Y + dX + eY + fZ + Q \\ Z' &= Z + gX + hY + kZ + R. \end{aligned}\right.$$

Or, sur la figure (25) et en ayant égard au sens des axes et des forces, nous avons :

$$X = H\cos\zeta,\quad Y = -H\sin\zeta \text{ et } X' = H'\cos\zeta',\ Y' = -H'\sin\zeta'.$$

D'ailleurs, on a vu que :

$$Z = H\,\mathrm{tg}\,\theta.$$

Donc :

$$(37)\quad \frac{X'}{H} = (1+a)\cos\zeta - b\sin\zeta \qquad + c\,\mathrm{tg}\,\theta + \frac{P}{H};$$

$$(38)\quad \frac{Y'}{H} = d\cos\zeta \qquad -(1+e)\sin\zeta + f\,\mathrm{tg}\,\theta + \frac{Q}{H};$$

$$(39)\quad \frac{Z'}{Z} = \frac{g}{\mathrm{tang}\,\theta}\cos\zeta - \frac{h}{\mathrm{tang}\,\theta}\sin\zeta + 1 + k + \frac{R}{Z} = \frac{g}{\mathrm{tang}\,\theta}\cos\zeta - \frac{h}{\mathrm{tang}\,\theta}\sin\zeta + \mu,$$

en posant :

$$\mu = 1 + k + \frac{R}{Z}.$$

On donne encore à ces expressions la forme suivante que nous emploierons plus loin :

$$\frac{X'-X}{H}=a\cos\zeta-b\sin\zeta+\lambda\mathfrak{B}; \tag{40}$$

$$\frac{Y'-Y}{H}=d\cos\zeta-e\sin\zeta+\lambda\mathfrak{C}; \tag{41}$$

$$\frac{Z'-Z}{Z}=g\cos\zeta-h\sin\zeta+\lambda V, \tag{42}$$

en posant :

$$\lambda V=k\tang\theta+\frac{R}{H};$$

équations qui donnent les composantes, non plus de la force magnétique de la terre et du navire, mais de la force magnétique exercée par le navire seul sur le pôle n de l'aiguille, exprimées les deux premières en parties de H, la dernière en parties de Z, c'est-à-dire en prenant, comme unité de force horizontale, la composante horizontale terrestre et comme unité de force verticale la composante verticale terrestre.

En introduisant dans les équations 37, 38, 39 les coefficients dits exacts et faisant passer dans le premier membre λ qui est en facteur commun dans le second, on a encore :

$$\frac{X'}{\lambda H}=(1+\mathfrak{D})\cos\zeta+(\mathfrak{A}-\mathfrak{E})\sin\zeta+\mathfrak{B}=\frac{H'\cos\zeta'}{\lambda H}: \tag{44}$$

$$\frac{Y'}{\lambda H}=(\mathfrak{A}+\mathfrak{E})\cos\zeta-(1-\mathfrak{D})\sin\zeta+\mathfrak{C}=-\frac{H'\sin\zeta'}{\lambda H}: \tag{45}$$

et on a alors les composantes vers l'avant et vers tribord de la force magnétique exercée par le magnétisme du navire et de la terre, exprimées en parties de λ H, c'est-à-dire en prenant comme unité de force, la force magnétique λ H.

CHAPITRE II

CALCUL DE λ ET DES CINQ COEFFICIENTS EXACTS AU MOYEN D'OBSERVATIONS DE RAPPORTS DE FORCES MAGNÉTIQUES

Revenons maintenant aux équations (8) et (9) et donnons successivement à ζ, dans ces deux équations, les huit valeurs qui correspondent aux huit rumbs principaux du compas; chacune de ces équations nous donnera un groupe de huit équations dont nous écrivons ci-dessous la première et la dernière, les autres se formant sans difficulté :

$$\left\{\begin{array}{l} \dfrac{H'_0 \cos \delta_0}{\lambda H} = 1 + \mathfrak{B} + \mathfrak{D} \\ \cdots\cdots \\ \dfrac{H'_{315} \cos \delta_{315}}{\lambda H} = 1 + \mathfrak{B}\sqrt{\dfrac{1}{2}} + \mathfrak{C}\sqrt{\dfrac{1}{2}} + \mathfrak{E} \end{array}\right. \quad (47) \left\{\begin{array}{l} \dfrac{H'_0 \sin \delta_0}{\lambda H} = \mathfrak{A} + \mathfrak{C} + \mathfrak{E} \\ \cdots\cdots \\ \dfrac{H'_{315} \sin \delta_{315}}{\lambda H} = \mathfrak{A} - \mathfrak{B}\sqrt{\dfrac{1}{2}} + \mathfrak{C}\sqrt{\dfrac{1}{2}} - \mathfrak{D}. \end{array}\right.$$

Calcul du coefficient constant λ. — Les huit équations (46), additionnées en mettant à profit les propriétés connues des sommes de sinus et cosinus d'arcs en progression arithmétique, nous montrent ce que nous avions déjà indiqué dans la première partie, à savoir que le coefficient λ représente la force directrice *moyenne* vers le Nord de l'aiguille aimantée.

Quand les déviations ne dépassent pas 20 degrés, il est inutile, pour avoir une bonne valeur de λ, de faire ainsi huit observations du rapport $\frac{H'}{H}$, quatre suffisent. Voici comment on opère :

1° *Sans connaître les coefficients exacts et par la méthode des oscillations.* — A un cap magnétique quelconque ζ_a (on choisit les directions cardinales quand on le peut) on observe la variation, d'où l'on conclut la déviation δ_a ; on observe également le temps d'un même nombre d'oscillations de l'aiguille aimantée à bord et à terre, soit t et T. On a alors :

$$\frac{H'_a}{H} = \frac{T^2}{t^2}.$$

On multiplie ce rapport par le cosinus de la déviation correspondante et on a :

$$\lambda_a = \frac{H'_a}{H} \cos \delta_a.$$

On fait la somme des quantités correspondant à trois autres caps équidistants du premier et entre eux, et on a enfin :

$$\lambda = \frac{\lambda_a + \lambda_b + \lambda_c + \lambda_d}{4}.$$

2° *Au moyen d'une seule observation, quand on connaît les coefficients exacts.* — Nous verrons tout à l'heure qu'on obtient très facilement les coefficients exacts quand on a les coefficients approchés, et que c'est, en général, ainsi qu'on les calcule. Dès lors, à un cap quelconque, on observera la déviation; puis le rapport $\frac{H'_a}{H}$ comme nous l'avons montré plus haut, et on aura (v. éq. 8, p. 64) :

$$(48)\quad \lambda = \frac{H'_a}{H}\cos\delta_a \times \frac{1}{1+\mathfrak{B}\cos\zeta_a - \mathfrak{C}\sin\zeta_a + \mathfrak{D}\cos 2\zeta_a - \mathfrak{E}\sin 2\zeta_a}.$$

(Voir l'exemple numérique traité plus loin.)

Afin d'éliminer une partie des erreurs d'observation, il est bon de faire ce calcul pour deux caps diamétralement opposés, on prendra la moyenne pour λ.

3° *Au moyen du déflecteur.* — Le rapport $\frac{H'}{H}$ peut s'obtenir au moyen du déflecteur de sir W. Thomson plus rapidement que par la méthode des oscillations. Il suffira de graduer l'échelle du déflecteur comme nous l'indiquons dans la cinquième partie, et une observation d'une minute au plus donnera le rapport cherché.

Une fois la ou les valeurs du rapport $\frac{H'}{H}$ déterminées, on fait l'un ou l'autre des calculs précédents suivant qu'on connaît ou non les coefficients exacts.

4° *Pour un compas compensé.* — Quand on a compensé un compas de manière que ses déviations ne dépassent pas 3 degrés en valeur absolue, on peut admettre, sans erreur sensible dans la pratique, que la force directrice variable avec le cap du bâtiment, qui oriente l'aiguille à bord, est, dans ce cas, constante en grandeur et en direction.

Par conséquent, une seule observation du rapport $\frac{H'}{H}$ faite à un cap quelconque, soit par la méthode des oscillations, soit mieux au moyen du déflecteur, donne immédiatement, et sans calcul, la valeur de λ.

Calcul du coefficient constant $\mathfrak{A}$. — Les huit équations (47) additionnées montrent que $\mathfrak{A}$ est la moyenne des valeurs que prend la quantité $\frac{H'}{\lambda H}\sin\delta$ quand le cap du compas décrit la rose entière. Or, cette quantité représente la composante vers l'Est magnétique de la force qui oriente l'aiguille, exprimée en parties de λH prise comme unité, et nous avons déjà pris H comme unité de force magnétique. Par suite, nous dirons que le coefficient $\mathfrak{A}$ est la moyenne de la composante vers l'Est magnétique de la force qui oriente l'aiguille à bord, exprimée en parties de la force directrice moyenne λ.

Calcul des coefficients constants $\mathfrak{D}$ et de $\mathfrak{E}$. — En choisissant dans les équations (46) les quatre équations qui se rapportent aux quatre caps quadrantaux, on obtient aisément la valeur de $\mathfrak{D}$ en les combinant par voie d'addition et de soustraction.

En prenant ensuite dans les équations (47) les quatre équations qui correspondent aux mêmes caps et en les traitant de même, on aura facilement la valeur de $\mathfrak{E}$.

Nous ne les transcrivons pas ici, d'abord parce qu'elles n'offrent aucun intérêt après ce que nous avons dit dans la première partie de ces deux coefficients, et ensuite parce qu'on ne calcule jamais ces deux quantités de cette manière.

Calcul du coefficient variable $\mathfrak{B}$. — Deux équations convenablement choisies dans chacun des groupes (46) et (47) donnent :

$$(49)\qquad \mathfrak{B}=\frac{\frac{1}{4}\left[H'_0\cos\delta_0+H'_8\sin\delta_8-H'_{16}\cos\delta_{16}-H'_{24}\sin\delta_{24}\right]}{\lambda H}.$$

Un croquis très simple montre aisément que chacun des termes du numérateur, pris avec son signe, représente, pour le cap correspondant, celle des composantes de la force directrice de l'aiguille qui est dirigée vers l'avant du bâtiment.

$\mathfrak{B}$ n'est donc autre chose que la moyenne des composantes magnétiques dirigées vers l'avant du navire exprimée en parties de λH, force directrice moyenne de l'aiguille vers le Nord magnétique.

Quand $\mathfrak{B}$ est négatif, cela indique que cette composante moyenne est dirigée vers l'arrière du bâtiment.

Calcul du coefficient variable $\mathfrak{C}$. — On obtiendrait de même que pour le coefficient précédent :

$$(50)\qquad \mathfrak{C}=\frac{\frac{1}{4}\left[H'_0\sin\delta_0-H'_8\cos\delta_{28}-H'_{16}\sin\delta_{16}+H'_{24}\cos\delta_{24}\right]}{\lambda H}.$$

Comme pour $\mathfrak{B}$, un croquis nous montrera que le coefficient $\mathfrak{C}$ représente la moyenne des composantes vers tribord des forces directrices de l'aiguille aimantée.

Quand $\mathfrak{C}$ est négatif, cela signifie que cette composante moyenne est dirigée vers bâbord.

Force polaire du navire. — Chacune des composantes $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, ayant un signe qui détermine nettement sa direction, il est aisé de trouver, dans chaque cas, la direction de leur résultante, dont la grandeur est égale à $\sqrt{\mathfrak{B}^2 + \mathfrak{C}^2}$, et qui s'appelle indifféremment « Force polaire », ou intensité horizontale du navire (*fig.* 25).

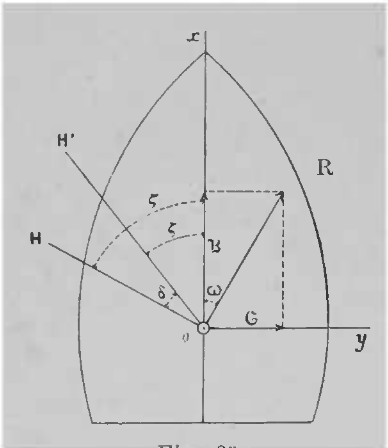


Fig. 25.

Expression qui provient de ce qu'on peut représenter l'action sur le compas des deux composantes $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ par celle d'un pôle d'aimant convenablement placé, invariablement lié au navire, tournant avec lui et ayant, pour composantes de la force qu'il exerce sur l'aiguille $\mathfrak{B}$ vers l'avant, $\mathfrak{C}$ vers tribord, pris chacune dans les directions déterminées par leurs signes.

Angle tribord. — Cette force polaire du bâtiment fait avec *ox*, c'est-à-dire avec la parallèle à la quille dirigée vers l'avant du bâtiment, un angle ω dont la tangente est égale à $\frac{\mathfrak{C}}{\mathfrak{B}}$ qu'on appelle « angle Tribord ».

Les signes de $\mathfrak{B}$ et de $\mathfrak{C}$ fixent, sans ambiguïté, la position de OR (*fig.* 25).

On représente l'effet des aimants permanents P et Q du navire par un pôle bleu unique B tel que la ligne $OB = \sqrt{P^2 + Q^2}$ et fasse avec *ox* un angle α compté de 0 à 360° en passant par tribord et dont la tangente naturelle soit égale à $\frac{Q}{P}$.

CHAPITRE III

INFLUENCE DE L'ARRANGEMENT DU FER DOUX A BORD SUR LES COEFFICIENTS

Du coefficient constant λ. — Ce coefficient est représenté également par l'expression :

$$\lambda = 1 + \frac{a + e}{2}$$

En se reportant aux figures de la planche II, on voit que toutes les pièces longitudinales, situées d'un même côté du compas par rapport à l'avant ou à l'arrière du navire, donnent un $+a$; ce sont les machines, la chaudière, les cheminées, les mâts en fer : toutes celles qui, au contraire, s'étendent d'un côté à l'autre du compas, donnent un $-a$ et ce sont, la quille, la carène du bâtiment, l'arbre de l'hélice, la cuirasse, les bordages des ponts en fer.

L'action du fer horizontal transversal est représentée par e; e est positif dans le très petit nombre de cas où des pièces de fer gisent tout entières d'un même côté du compas, sans que leur effet soit exactement contre-balancé par d'autres pièces semblables et semblablement placées; c'est ce qui arrive dans des cas exceptionnels pour les canons, la partie horizontale des bossoirs d'embarcation, etc., ou des chargements spéciaux, des embarcations en fer, par exemple, mises momentanément sur le pont.

En général, les pièces de fer transversales qui s'étendent de part et d'autre du compas, telles que les fonds du bâtiment, les ponts en fer, les baux, les machines, les chaudières, les cloisons transversales en fer, donnent à e une valeur négative.

λ est plus grand ou plus petit que 1, suivant que $\frac{a+e}{2}$ est lui-même plus grand ou plus petit que zéro. Or $\frac{a+e}{2}$ peut être plus grand que zéro de trois manières, soit parce que a et e sont tous deux à la fois plus grands que zéro,

soit parce que l'on a $a>0$ et $e<0$ avec $a>-e$,
soit enfin parce que $a<0$ et $e>0$ avec $e>-a$.

L'examen attentif des pièces de fer qui se trouvent autour du compas, et de l'influence qu'elles peuvent exercer sur lui, donnera de précieuses indications sur la valeur de λ.

En général, a est positif, e est négatif et plus grand que a en valeur absolue; il en résulte que λ est presque toujours plus petit que 1.

On devra s'attendre à avoir une faible valeur de λ toutes les fois que e aura une valeur négative, grande en valeur absolue, ainsi, pour les compas placés entre deux ponts en fer, c'est-à-dire dans le réduit cuirassé des navires de guerre, ou tout près des cloisons transversales en fer, surtout quand elles sont cuirassées.

Or, une trop grande diminution de force directrice a des inconvénients évidents pour l'orientation de la rose, notamment quand celle-ci est lourde, surtout quand, pour une raison quelconque, les frottements qui s'exercent entre le pivot et la chape deviennent irréguliers.

Mais la valeur absolue de λ n'est pas seule à considérer, car ce n'est, après tout, qu'une moyenne : ce qu'il faut encore, c'est que les variations de la force directrice soient faibles. On ne peut le savoir qu'en déterminant la valeur que prend le rapport de H' à H aux différents caps principaux de la rose, comme nous l'avons dit dans la première partie. En général, à bord des bâtiments en fer, et particulièrement des cuirassés, il est impossible de maintenir les variations de la force directrice dans des limites restreintes quand on ne compense pas les compas.

Du coefficient constant $\mathfrak{D} = \dfrac{a - e}{2\lambda}$. — La discussion à laquelle nous venons de nous livrer pour λ, peut servir pour $\mathfrak{D}$, qui dépend des mêmes constantes a et e.

Calcul de a et e. — Quand on a calculé λ et $\mathfrak{D}$, on peut alors calculer indirectement la valeur des paramètres a et e que nous ne savons pas déterminer à priori et qui représentent l'un, a, l'induction dans le fer doux longitudinal, l'autre, e, l'induction dans le fer doux transversal.

On a, alors :

$$a = \lambda\mathfrak{D} + \lambda - 1. \tag{51}$$

$$e = -\lambda\mathfrak{D} + \lambda - 1. \tag{52}$$

Des coefficients $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$. — Nous avons indiqué, dans la première partie, tout ce qu'il y avait d'intéressant à dire sur ces quantités.

Constance de λ, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$. — Ces quatre coefficients, ne dépendant que des paramètres a, e, b et d du fer doux qui sont constants, le sont eux-mêmes et ne varient pas, quand le navire se déplace à la surface du globe, pourvu, bien entendu, suivant la réserve déjà faite plus haut, que le magnétisme ait atteint un état voisin de son état d'équilibre. Un laps de temps de quelques mois seulement après le lancement suffit, d'ailleurs, pour rendre les variations de ces coefficients assez petites, pour qu'il ne soit pas dangereux, dans la pratique, de considérer ces quatre coefficients comme réellement constants.

Des coefficients variables $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. — Au contraire, les coefficients de la déviation semi-circulaire $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, même quand le magnétisme du navire a atteint son état d'équilibre, varient tous deux, et il faut déterminer leurs valeurs à nouveau chaque fois que le bâtiment s'est déplacé d'une façon un peu notable à la surface du globe.

Table des valeurs des coefficients $\mathfrak{D}$, λ, a, e et g pour différents types de navires en fer. (V. p. 158-160).

			D +	$\mathfrak{D}$ +	λ	a	e	g
Navires de guerre en fer et cuirassés. (*Ponts en fer.*)	*Minotaur*. 6,621 tonnes.	Compas étalon.	5° 43′	0,100	0,892	— 0,019	— 0,197	— 0,025
		de route..	5 56	0,103	0,811	— 0,106	— 0,272	
		du pont.	5 22	0,093	0,850	— 0,024	— 0,216	
	Warrior.. 6,109 tonnes.	Compas étalon, en avant..	5 49	0,101	0,867	— 0,045	— 0,221	+ 0,069
		Compas étalon, derrière, près la tour en fer..	8 27	0,148	0,873	+ 0,002	— 0,256	
		Compas de route..	11 56	0,208	0,833	+ 0,006	— 0,340	
	Black-Prince. 6,109 tonnes.	Compas étalon.	7 38	0,134	0,783	— 0,112	— 0,322	+ 0,118
		de route..	10 32	0,184	0,760	— 0,100	— 0,380	
		de pont...	13 16	0,231	0,757	— 0,068	— 0,418	
	Defence, 3,720 tonnes.	Compas étalon.	7 0	0,122	0,822	— 0,078	— 0,278	+ 0,157
		de route..	10 16	0,179	0,794	— 0,064	— 0,348	
		de pont...	14 35	0,254	0,759	— 0,048	— 0,434	
Navires de guerre en bois et cuirassés. (*Le pont supérieur en fer.*)	*Royal-Oak*.. 4,056 tonnes.	Compas étalon.	3 9	0,055	0,907	— 0,043	— 0,143	+ 0,127
		de route..	1 47	0,031	0,906	— 0,066	— 0,122	
		de pont...	1 28	0,026	0,862	— 0,116	— 0,160	
	Lord-Warren. 4,045 tonnes.	Compas étalon.	3 0	0,052	0,934	— 0,022	— 0,110	+ 0,060
		de route..	4 0	0,069	0,910	— 0,027	— 0,153	
Navires de transport en fer et à hélice.	*Euphrates*.. 4,173 tonnes.	Compas étalon..	5 39	0,098	0,851	— 0,066	— 0,232	
		de route..	6 52	0,120	0,844	— 0,055	— 0,257	
	Jumna.. 4,173 tonnes.	Compas étalon..	6 8	0,107	0,865	— 0,044	— 0,226	+ 0,070
		de route..	6 39	0,116	0,850	— 0,051	— 0,249	
	Serapis. 4,173 tonnes.	Compas étalon..	4 55	0,066	0,905	— 0,017	— 0,173	
		de route..	4 10	0,073	0,853	— 0,085	— 0,209	
	Orontes. 2,812 tonnes.	Compas étalon..	5 30	0,096	0,875	— 0,041	— 0,209	+ 0,066
		de route..	7 16	0,126	0,862	— 0,029	— 0,247	
	Industry.. 638 tonnes.	Compas étalon..	2 58	0,052	0,937	— 0,014	— 0,112	
Navire de guerre à roues et en fer.	*Caradoc*.. 676 tonnes.		2 3	0,036	0,945	— 0,021	— 0,089	
Navires marchands à voiles et en fer.	*Clyde*. 1,100 tonnes.		4 43	0,082	0,870	— 0,059	— 0,201	
	City-of-Sydney. 1,181 tonnes.		4 32	0,079	0,816	— 0,120	— 0,248	
Le plus grand navire en fer à roues et à hélice. (*Ponts en fer.*)	*Great-Eastern*, 22,060 tonnes.	Compas arrière, près l'étambot.	4 21	0,076	0,841	— 0,095	— 0,223	
		Compas sur le gaillard d'avant..	4 31	0,079	0,892	— 0,038	— 0,178	

CHAPITRE IV

MÉTHODE PRATIQUE POUR LE CALCUL DES CINQ COEFFICIENTS EXACTS

En général, ainsi que nous l'avons déjà indiqué, on calcule, avant tout, les coefficients approchés A, B, C, D, E ; de ceux-ci, on déduit les cinq coefficients exacts correspondants par les formules que nous allons donner ; et, cela fait, on en déduit λ par une ou mieux deux observations de rapport d'intensité de forces magnétiques, comme il est dit plus haut.

Relations entre les coefficients exacts et les coefficients approchés.

L'équation (10) de la première partie nous a donné l'équation (11) par des substitutions convenables.

Les quantités $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, ayant toujours des valeurs absolues plus considérables que celles de $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$, on convient de regarder les premières comme étant du premier ordre de petitesse, les secondes comme du second ordre de petitesse, c'est-à-dire comme comparables aux carrés des quantités $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$.

Pour simplifier, on convient de négliger, dans les égalités successives que l'on déduit des deux équations précédentes, toutes les quantités d'un ordre de grandeur égal ou supérieur à $\mathfrak{B}^4$, $\mathfrak{C}^4$, $\mathfrak{D}^4$, comme, par exemple, $\mathfrak{A}\mathfrak{B}^2$. $\mathfrak{E}\mathfrak{D}^2$, etc., autrement dit, tous les produits de coefficients exacts où la somme des ordres de petitesse de tous les facteurs est supérieure à trois.

Coefficients approchés en fonction des coefficients exacts. — On a ainsi, avec une exactitude suffisante pour la pratique, toutes les fois que les déviations sont plus petites que 40 degrés :

$$(53)\quad \left\{\begin{aligned} &A=\mathfrak{A} \qquad D=\mathfrak{D} \qquad E=\mathfrak{E}+\mathfrak{A}\mathfrak{D}\\ &B=\mathfrak{B}\left(1-\frac{\mathfrak{D}}{2}+\frac{\mathfrak{B}^2}{8}+\frac{\mathfrak{C}^2}{8}+\frac{\mathfrak{D}^2}{4}\right)-\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{C}}{2}\\ &C=\mathfrak{C}\left(1+\frac{\mathfrak{D}}{2}+\frac{\mathfrak{B}^2}{8}+\frac{\mathfrak{C}^2}{8}+\frac{\mathfrak{D}^2}{4}\right)-\frac{\mathfrak{E}\mathfrak{B}}{2}.\end{aligned}\right.$$

N'oublions pas que nous obtiendrons ainsi les coefficients approchés en parties du rayon et que, pour les avoir en degrés comme il est nécessaire pour employer la formule (12), il faudra multiplier les valeurs ainsi obtenues par 57° 3 : nombre de degrés d'une circonférence contenus dans un arc de longueur égal à son rayon.

Quand les déviations sont inférieures à 20 degrés, et ce sera le cas général (puisque nous avons vu qu'il ne fallait jamais employer de compas dont les déviations eussent des valeurs supérieures sans les réduire à cette grandeur par une compensation même imparfaite), on emploiera les formules plus simples :

$$(54)\quad \begin{cases} A = \mathfrak{A} \quad D = \mathfrak{D} \quad E = \mathfrak{E} \\ B = \mathfrak{B}\left(1 - \frac{\mathfrak{D}}{2}\right) \\ C = \mathfrak{C}\left(1 + \frac{\mathfrak{D}}{2}\right). \end{cases}$$

Coefficients exacts en fonction des coefficients approchés. — De ces expressions, on obtient, par substitutions successives quand les déviations sont plus petites que 40 degrés :

$$(55)\quad \begin{cases} \mathfrak{A} = \sin A \\ \mathfrak{B} = \sin B\left(1 + \frac{1}{2}\sin D + \frac{1}{1.2}\sin\text{vers}\, B - \frac{1}{4}\sin\text{vers}\, C\right) + \frac{1}{2}\sin C \sin E. \\ \mathfrak{C} = \sin C\left(1 - \frac{1}{2}\sin D - \frac{1}{4}\sin\text{vers}\, B + \frac{1}{12}\sin\text{vers}\, C\right) + \frac{1}{2}\sin B \sin E. \\ \mathfrak{D} = \sin D\left(1 + \frac{1}{3}\sin\text{vers}\, D\right) \\ \mathfrak{E} = \sin E - \sin A \sin D. \end{cases}$$

Quand les déviations sont inférieures à 20 degrés, on a les formules plus simples :

$$(56)\quad \begin{cases} \mathfrak{A} = \sin A \quad \mathfrak{D} = \sin D \quad \mathfrak{E} = \sin E \\ \mathfrak{B} = \sin B\left(1 + \frac{1}{2}\sin D\right) \\ \mathfrak{C} = \sin C\left(1 - \frac{1}{2}\sin D\right) \end{cases}$$

Exemples numériques. — Pour le navire le *Trident*, dont la déviation maxima observée est de 24 degrés, nous avons trouvé, dans la deuxième partie :

$$A = -0°,13' \quad B = +21°40' \quad C = -3°27' \quad D = +3°42' \quad E = +0°13'$$
$$\sin A = -0{,}004 \quad \sin B = +0{,}369 \quad \sin C = -0{,}060 \quad \sin D = +0{,}065 \quad \sin E = +0{,}004$$
$$1/2 \sin D = +0{,}032.$$

On aura donc, par les formules (56) :

$$\mathfrak{A} = -0{,}004 \qquad \mathfrak{B} = +0{,}369\,(1 + 0{,}032) = +0{,}382$$
$$\mathfrak{E} = +0{,}004 \qquad \mathfrak{C} = -0{,}060\,(1 - 0{,}032) = -0{,}058$$
$$\mathfrak{D} = +0{,}065.$$

Si on avait appliqué les formules plus exactes (55), on aurait trouvé pour $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{D}$ et $\mathfrak{E}$ les mêmes valeurs, car les termes correctifs qui entrent alors dans ces deux dernières valeurs sont absolument négligeables; quant aux deux autres coefficients, le calcul donne :

$$\mathfrak{B} = +0{,}383 \qquad \mathfrak{C} = -0{,}056.$$

2e Exemple :

Appliquons encore ces formules au cas d'un autre navire, le *Warrior*, où les coefficients approchés sont :

$$A = -1^\circ 00' \quad B = -22^\circ 12' \quad C = -5^\circ 52' \quad D = +8^\circ 56' \quad E = +0^\circ 44'$$

Les formules simples (56), nous donneront :

$$\mathfrak{A} = -0{,}017 \qquad \mathfrak{B} = -0{,}406$$
$$\mathfrak{E} = +0{,}013 \qquad \mathfrak{C} = -0{,}094$$
$$\mathfrak{D} = +0{,}155.$$

Les formules beaucoup plus compliquées (55) nous auraient donné :

$$\mathfrak{A} = -0{,}017 \qquad \mathfrak{B} = -0{,}410$$
$$\mathfrak{E} = +0{,}015 \qquad \mathfrak{C} = -0{,}095$$
$$\mathfrak{D} = +0{,}156.$$

Les différences sont encore insignifiantes, bien que D ait une valeur qu'il dépasse rarement.

Remarque importante. — Il ne faut pas oublier que ces formules nous donnent les coefficients exacts en parties de la force moyenne λH, prise comme unité. Si on venait à changer d'unité de force et à prendre H, par exemple, la force moyenne serait représentée alors par λ et, par suite, les coefficients par les nombres $\lambda\mathfrak{A}$, $\lambda\mathfrak{B}$, $\lambda\mathfrak{C}$, $\lambda\mathfrak{D}$, $\lambda\mathfrak{E}$.

C'est ce qui arrive, par exemple, quand on transporte le compas à terre, alors sa force directrice moyenne est évidemment H et les mêmes forces perturbatrices qui, à bord, produisaient des déviations égales à $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, etc., donneront à terre les déviations $\lambda\mathfrak{A}$, $\lambda\mathfrak{B}$, etc.

Cette remarque est importante pour ne pas commettre d'erreurs dans l'emploi de la méthode graphique qui suit. Elle ne doit point être oubliée quand, comme dans les méthodes de compensation données par le *Manuel de l'amirauté anglaise*, on cherche, par des tâtonnements faits à terre, la position que les compensateurs doivent occuper à bord pour corriger les déviations qu'on y a observées.

CHAPITRE V

MÉTHODE GRAPHIQUE POUR OBTENIR LA DÉVIATION ET LA FORCE DIRECTRICE CORRESPONDANT A UN CAP MAGNÉTIQUE DONNÉ (*fig.* 26)

Nous allons faire connaître une méthode graphique qui repose sur la connaissance des coefficients exacts et qui, non seulement donne une représentation élégante et commode des formules antérieures, mais fournit encore un contrôle rapide et sûr des calculs souvent assez longs auxquels ces formules conduisent. Si les résultats des calculs et de la méthode graphique concordent à peu de chose près, on peut les regarder comme exacts et les employer avec confiance. Si, au contraire, il y a désaccord, on est averti qu'il y a une erreur de calcul ou de construction, et ces dernières sont si aisées à vérifier qu'on sait bientôt, en les recommençant, si le calcul est exact ou non, sans être obligé de refaire ce dernier, procédé qui est long sans être sûr.

Cette méthode a été imaginée d'abord par sir Archibald Smith; mais c'est le lieutenant de vaisseau Colongue, de la marine Impériale Russe, qui lui a donné la forme élégante que nous allons exposer. *Construction géométrique des formules 8 et 9*, page 64.

Supposons, qu'ayant trouvé, par des observations de déviation, les valeurs des cinq coefficients approchés, nous en ayons tiré au moyen des formules (55) les valeurs suivantes pour les coefficients exacts :

$$\mathfrak{A}=0{,}07 \quad \mathfrak{E}=0{,}09 \quad \mathfrak{B}=0{,}416 \quad \mathfrak{C}=0{,}604 \quad \mathfrak{D}=0{,}302.$$

Et proposons-nous de construire géométriquement, au moyen des formules (8) et (9), les valeurs des composantes à bord, vers le Nord et vers l'Est magnétiques, de la force directrice qui oriente l'aiguille.

Pour cela, soient O P et O Q (*fig.* 26) les directions du Nord et de l'Est magnétiques.

Sur la ligne O P, prenons une longueur quelconque, O P, la plus grande possible, mais telle, cependant, que toutes nos constructions tiennent sur le papier.

Cette longueur choisie arbitrairement, sans que λ ait besoin d'être connu, représentera désormais, pour nous, la quantité λ H, force directrice moyenne de l'aiguille vers le Nord, ou, quand on prend H pour unité de force magnétique, le coefficient λ. C'est l'unité de longueur de la figure, on conçoit donc que, pour la rapidité des constructions, il convient qu'elle soit une fraction très simple du mètre, $\frac{1}{20}$, et mieux $\frac{1}{10}$ si les dimensions du papier nous le permettent; nous avons pris ici comme unité $\frac{1}{40}$ du mètre ou $0^{m},025$ ce qui est sans inconvénient, puisque la figure ne sert qu'à l'exposition de la méthode.

En P, élevons une perpendiculaire à O P et sur cette ligne portons, à partir de P à la droite de O P, c'est-à-dire vers l'Est si $\mathfrak{A}$ est positif; à la gauche, c'est-à-dire vers l'Ouest si $\mathfrak{A}$ est négatif, une longueur P A qui, à l'échelle de la carte, représentera la valeur numérique de $\mathfrak{A}$.

Sur cette même perpendiculaire, mais à partir du point A, portons, d'après les *mêmes conventions*, une longueur A E qui, à l'échelle de la carte, représentera la valeur numérique du coefficient $\mathfrak{E}$.

Au point E, menons une parallèle à O P et, sur cette parallèle, portons, à partir de E vers le Nord si $\mathfrak{D}$ est $+$, vers le Sud si $\mathfrak{D}$ est $-$, une longueur E D qui, à l'échelle de la carte, représente le coefficient $\mathfrak{D}$.

Sur cette même parallèle, mais à partir de D et suivant les *mêmes conventions*, portons une longueur D B qui représente le coefficient $\mathfrak{B}$.

En B, menons une perpendiculaire à O P et portons sur cette droite, à partir de B, vers la droite ou vers la gauche suivant que $\mathfrak{C}$ est $+$ ou $-$, une longueur B N qui représentera le coefficient $\mathfrak{C}$.

Joignons ON, il est facile de voir que cette ligne a pour projection sur OP, $1+\mathfrak{B}+\mathfrak{D}$, et pour projection sur OQ, $\mathfrak{A}+\mathfrak{E}+\mathfrak{C}$, c'est-à-dire que ces deux projections représentent respectivement les valeurs de $\frac{H'}{\lambda H}\cos\delta$ et $\frac{H'}{\lambda H}\sin\delta$, qui correspondent au cap magnétique $\zeta=0$.

Donc, 1° ON représente la quantité $\frac{H'}{\lambda H}$, c'est-à-dire la force directrice de l'aiguille, quand le cap est le Nord magnétique, et que l'on prend, comme unité de force, λH;

Et 2° l'angle P O N représente la déviation δ correspondant au cap Nord magnétique du bâtiment; déviation qui, d'après nos conventions, sera affectée du signe $+$ si la droite O N est à droite de O P; et du signe $-$ si elle est à gauche.

Construction du dygogramme (*fig.* 26) [1] — Il serait long de construire, point par point, le lieu des points tels que N quand le cap magnétique varie de 0 à 360 degrés; on obtient très aisément cette courbe qu'on appelle dygogramme de la manière suivante, qui repose sur des propriétés géométriques que nous n'avons pas à établir ici.

De A comme centre avec AD, c'est-à-dire $\sqrt{\mathfrak{D}^2 + \mathfrak{E}^2}$ pour rayon, décrivons un cercle que nous appellerons dorénavant cercle directeur. Joignons DN et prolongeons cette ligne jusqu'en un point S tel que $DS = ND$. Il est aisé de voir que le point S est le point du dygogramme qui correspond au cap Sud magnétique : soit Q le second point d'intersection de cette droite DN avec le cercle; ce point Q s'appelle le pôle du dygogramme et jouit d'une propriété remarquable qui permet de tracer immédiatement la courbe.

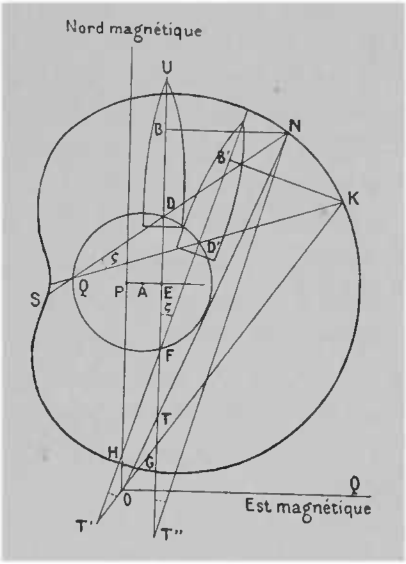


Fig. 26.

Prenons une bande de papier de longueur NS et faisons-la mouvoir de façon que son milieu, restant toujours sur le cercle directeur, elle passe toujours par le point Q, les points N et S décriront la courbe tracée sur la figure et chacune des positions de la droite donnera deux points de cette courbe qui correspondront, l'un au cap magnétique ζ, l'autre au cap magnétique $\zeta + 180$ degrés, ζ étant l'angle compris entre la direction QN et la position de la bande de papier, angle qu'on comptera de 0 à 360 degrés à partir de QN, en allant du Nord vers l'Est, puis le Sud, ensuite l'Ouest. On verra tout à l'heure qu'il ne peut jamais y avoir ambiguïté entre ces deux points, quand on se réfère au cap du bâtiment.

1er Cas. — Obtenir la force et la déviation correspondant à un cap vrai ou magnétique donné quand la courbe est tracée (*fig.* 26).

Ayant tracé la droite QN, au moyen des valeurs données des

1. Contraction de dynamo-gonio-gramme, c'est-à-dire mesure cu diagramme de la force et de l'angle. Mot bien choisi, puisque cette courbe nous donne la force magnétique à bord, et la déviation ou l'angle de cette force avec la force magnétique terrestre.

coefficients exacts, nous mènerons la droite Q K telle que l'angle $NQK = \zeta$.

Soit K l'intersection de cette droite avec le dygogramme, il est facile de montrer que l'angle P O K représente la déviation et la droite O K la force cherchées.

En effet, cherchons les projections de O K sur les deux axes, et d'abord sur O P. Cette projection est évidemment égale à la somme des projections sur la même ligne des lignes O P, P A, A D', D' K; D' étant le second point d'intersection de Q K avec le cercle.

Les projections de O P et de P A sont respectivement 1 et 0. A D' n'est autre chose que A D qu'on a fait tourner de 2ζ, pour avoir sa projection sur O P, il suffit de projeter sur cette dernière ligne les deux composantes $\mathfrak{D}$ et $\mathfrak{E}$ de A D après les avoir fait tourner de 2ζ, ce qui nous donnera $\mathfrak{D} \cos 2\zeta - \mathfrak{E} \sin 2\zeta$.

Quant à D' K, elle est, par hypothèse, égale à D N qui est la résultante de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$; elle fait, d'ailleurs, un angle ζ avec cette droite, et, par suite, sa projection sur O P sera $\mathfrak{B} \cos \zeta - \mathfrak{C} \sin \zeta$.

On établirait de même que la projection de OK sur OQ =

$$\mathfrak{A} + \mathfrak{B} \sin \zeta + \mathfrak{C} \cos \zeta + \mathfrak{D} \sin 2\zeta + \mathfrak{E} \cos 2\zeta,$$

donc la droite OK, et l'angle POK représentent bien respectivement la force directrice et la déviation de l'aiguille au cap magnétique considéré.

Remarque importante. — Quand on demande la déviation δ_a qui correspond à un cap déterminé ζ_a, nous avons dit qu'il fallait tirer du point Q une droite Q K faisant avec N Q l'angle ζ_a et prendre le point d'intersection K de cette droite avec le dygogramme, pour le joindre au point O. L'angle P O K est la déviation cherchée. Dans le cas de notre figure, la *portion* de droite qui part de Q en faisant avec N Q un angle ζ n'a jamais qu'un point d'intersection avec le dygogramme, il ne saurait donc y avoir aucune difficulté. Mais, dans certains autres cas, le dygogramme est à boucles, la portion de droite en question peut avoir deux points d'intersection avec la courbe, et il faut choisir entre eux le point convenable. Bien qu'alors le sentiment de la continuité suffise généralement pour déterminer ce choix, on est certain de ne jamais se tromper en agissant comme il suit.

Quand $\zeta = 0$ nous obtenons, sans ambiguïté, le point D du cercle directeur. Nous supposerons que ce point représente la place du compas à bord, et nous tracerons autour de lui un croquis grossier représentant la position du bâtiment pour ce cap. Considérons alors le point F, second point d'intersection de la corde du cercle directeur, parallèle à O P et passant par D : d'après la propriété des angles inscrits dans un même segment, il est clair qu'à la droite Q K du dygogramme, correspondra le cap du bâtiment F D'. C'est donc de ce point F que rayonneront les droites qui représentent les caps successifs du navire, et nous savons que nous devons supposer le compas du navire placé au *second* point d'intersection de la droite variable F U avec le cercle directeur. Ce second point une fois déterminé, et il est unique, on tracera autour de lui un croquis grossier du bâtiment, et alors les valeurs absolues et les signes des quantités $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ fixent, sans ambiguïté, le point du dygogramme que l'on doit prendre.

2e Cas. — **Obtenir, à un cap quelconque, la force directrice en parties de λ H et la déviation quand on connaît les cinq coefficients exacts.**

Souvent, dans la pratique, on n'a pas besoin de tracer le dygogramme tout entier, et il suffit, pour résoudre les problèmes qui se présentent, d'avoir le point particulier qui convient à une route magnétique déterminée.

Dans ce cas, on obtient aisément K de la manière suivante : soit F le second point d'intersection de la droite D E avec le cercle directeur, F D' est la direction du cap du bâtiment correspondant à la route magnétique ζ; et, pour avoir K, il suffira de porter sur cette droite à partir de D', vers l'avant ou vers l'arrière suivant que $\mathfrak{B}$ est + ou — la longueur qui représente $\mathfrak{B}$. On obtient ainsi le point B' : en élevant, en ce point, une perpendiculaire au cap du bâtiment et portant sur cette droite, vers la droite ou vers la gauche, suivant que $\mathfrak{C}$ est + ou — une longueur B' K égale à $\mathfrak{C}$, on aura le point K. Cette manière de déterminer le point K donne de suite la solution du problème suivant qu'on rencontre dans la pratique.

Trouver les coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, quand on a $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$ avec le rapport $\frac{H'}{\lambda H}$ et δ à un cap donné.

Pour cela, il faut avoir λ, car ce qu'on détermine par des observations de rapports d'intensités de force horizontale, c'est $\frac{H'}{H}$ et non $\frac{H'}{\lambda H}$.

Sur notre figure (26), les données sont donc le point D', la droite

OK, faisant avec OP un angle égal à δ_a. et qui est égale à $\frac{H'_a}{H} \times \frac{1}{\lambda}$.

Ayant le point K, on aura 𝔅 et ℭ en abaissant de ce point une perpendiculaire sur F D′.

Les signes de 𝔅 et ℭ seront donnés sans ambiguïté si on prend soin de faire autour de D′ une esquisse grossière du contour du bâtiment. 𝔅 sera + si D′ B′ est dirigé vers l'avant, et — si cette ligne est dirigée vers l'arrière : ℭ sera + si B′ K est dirigé vers tribord quand on regarde dans la direction du cap et — si cette ligne est dirigée vers bâbord.

3ᵉ Cas. — **Sans connaître λ, obtenir la force directrice en parties de λ H et la déviation à un cap quelconque, ou, ce qui revient au même, les deux coefficients 𝔅 et ℭ, quand on connaît 𝔄, 𝔇, 𝔈 et deux déviations à des caps donnés.**

Quand on connaît seulement les coefficients 𝔄, 𝔇, 𝔈, mais non pas la quantité λ, on peut encore obtenir le point K, mais il faut remplacer la donnée λ qui nous manque par une seconde déviation observée.

Dans ce cas, les données sont les droites F D et F D′ correspondant aux deux caps magnétiques du bâtiment où l'on a observé les déviations ; et les deux droites O T et O T′ faisant, avec O P, des angles respectivement égaux à chacune des deux déviations données et correspondant aux deux caps indiqués. Si nous trouvons un des points N ou K, le problème sera résolu d'après ce que nous avons dit dans le paragraphe précédent.

Nous allons montrer qu'on trouve facilement le point N au moyen des données.

En effet, soit T, le point d'intersection du premier cap F D avec la ligne O N qui donne la déviation à ce cap. Soit de même T′ le point d'intersection du second cap F D′ avec la ligne O K qui donne la déviation à ce cap.

Prenons sur le premier cap D F une longueur D T″ = D′ T′ que nous porterons à partir de D et dans un sens qui sera déterminé par celui de la longueur D′ T′ relativement au cap correspondant F D′. Par ce point T″, menons une droite T″ V telle que l'angle D T″ V soit égal à l'angle D′ T′ K, que fait le second cap D′ T′ avec la droite O K qui correspond à la déviation à ce cap.

Je dis que le point d'intersection de O T avec cette ligne T′ V sera le point N cherché.

En effet, en supposant le problème résolu et le dygogramme construit, on voit aisément sur la figure que les deux triangles N D T″ et K D′ T′ sont égaux puisque l'on a N D = K D′; D T″ = D′ T′ et que l'angle en T″ est égal par construction à l'angle T′. Le point N devant se trouver à la fois sur la droite O T et sur la droite T″ V se trouve à leur intersection.

La droite O N, mesurée avec O P prise comme unité, et l'angle P O N sont respectivement la force directrice et la déviation cherchées.

Détermination de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ avec les mêmes données.

Ayant trouvé le point N, comme il vient d'être dit, on achèvera le problème comme tout à l'heure en abaissant de N une perpendiculaire sur le cap F D du bâtiment qui correspond au point N du dygogramme.

Ce point N sera d'autant mieux déterminé que les droites qui le donnent par leur intersection, seront plus près d'être perpendiculaires, et d'autant plus mal qu'elles seront plus voisines du parallélisme.

Or, dans le triangle T T″ N, l'angle que nous considérons T N T″ est égal à l'angle extérieur à ce triangle D′ T N, moins l'angle T T″N qui est égal lui-même à l'angle en T′, et ces deux angles sont respectivement égaux à : $\delta_a - \zeta_a$ et $\delta_b - \zeta_b$, c'est-à-dire par définition de δ, aux routes au compas : $-\zeta'_a, -\zeta'_b$.

Il faut donc que l'on ait $\zeta'_a - \zeta'_b$ voisin de 90 degrés ou le plus différent possible de 0 ou 180 degrés.

Remarquons qu'ici nous nous sommes servis d'une figure déjà construite et où ζ_a était égal à 0, mais il est aisé de voir que cela n'altère pas notre raisonnement qui convient au cas général.

Simplification du dygogramme quand $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ sont négligeables. — La construction du dygogramme sera notablement simplifiée si, comme il arrive fréquemment, $\mathfrak{A}$ ou $\mathfrak{E}$, ou $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$, peuvent être négligés et considérés comme nuls; ce qui peut se faire toutes les fois que ces coefficients sont égaux ou inférieurs à 0,006. Nous ne dirons rien de ces cas particuliers, les simplifications à faire alors aux constructions précédentes n'offrant aucune difficulté quand on s'est bien pénétré de la solution des trois problèmes fondamentaux que nous avons résolus dans le cas général.

Avantages du dygogramme. — Il faut insister encore sur ce qu'on peut tracer cette courbe et obtenir la déviation à un cap quelconque sans avoir la quantité λ elle-même, et ceci tient à ce que la tangente de δ, qui nous est donnée par la formule (7) de la première partie, ne dépend que du rapport des deux composantes vers le Nord et l'Est magnétiques, rapport indépendant de λ qui est facteur commun de tous ses termes.

La valeur de λ ne devient nécessaire que si, avec la déviation, on veut encore obtenir, en parties de λH prise comme unité, la force directrice qui oriente l'aiguille du compas à un cap donné.

Mais, même quand on n'a pas λ, la seule vue de la courbe qu'on trace en moins de cinq minutes donne de suite un renseignement précieux en montrant par les longueurs diverses des droites, qui vont de O aux différents points du dygogramme, les variations de la force directrice qui oriente l'aiguille du compas autour de sa valeur moyenne O P.

En particulier, dans la figure (26), on voit de suite, d'abord, que ces variations sont considérables, ensuite, qu'entre les caps représentés par les lignes Q G et Q H, la force directrice ne sera pas assez considérable pour mettre le compas dans de bonnes conditions, puisqu'elle ne sera alors que le sixième environ de sa valeur moyenne. Et cette valeur moyenne est presque toujours, ne l'oublions pas, plus faible que la valeur de la force magnétique à terre.

Importance du dygogramme. — Quand on a la valeur de λ, le dygogramme donne non seulement la déviation et les variations de la force directrice autour d'une valeur moyenne qui, elle, est inconnue, mais encore cette dernière inconnue, qui permet de déterminer le rapport de H' à H pour chaque cap. On a ainsi les caps où l'on peut craindre la paresse du compas et où il faudra surveiller ce dernier plus particulièrement.

La figure 26 montre bien les avantages de la compensation partielle et la supériorité de la compensation totale.

La compensation partielle annule, en effet, ou à très peu près, les coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$; supposons, pour fixer les idées, qu'elle les annule. Le dygogramme se réduit alors au cercle de rayon A D, et les oscillations de la force directrice autour de sa valeur moyenne sont notablement diminuées. Quant à la compensation complète, outre les résultats précédents, elle annule $\mathfrak{D}$ ou à très peu près. Supposons qu'elle l'annule exactement. Dans ce cas, le cercle de rayon AD se réduit à son centre, et l'on voit ainsi qu'un compas entièrement compensé a les avantages suivants. A tous les caps, la force directrice de l'aiguille est constante, et la déviation conserve également une valeur égale au coefficient $\mathfrak{A}$.

Simplification du dygogramme. — En général, pour les compas dont l'axe est situé dans le plan longitudinal, et qui ont été placés avec soin, les coefficients $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ sont nuls ou négligeables, ce qui simplifie notablement le tracé du dygogramme.

CHAPITRE VI

EXEMPLES DE CALCULS NUMÉRIQUES ET D'EMPLOI DE LA MÉTHODE GRAPHIQUE

Nous empruntons les données et les calculs de cet exemple à l'excellent ouvrage publié en 1878 sur les *Déviations des compas*, par M. Gelgich, directeur de l'École d'hydrographie de Cattaro. L'auteur a employé seulement la méthode par le calcul, mais nous avons pensé que nous ne pouvions trouver un exemple plus probant de l'avantage de la méthode graphique, qu'en l'employant dans ce cas particulier qui lui est particulièrement défavorable comme on le verra par la figure 27.

Données. — A bord du navire de guerre autrichien *le Don Juan d'Autriche,* on a trouvé, pour les cinq coefficients approchés, les valeurs :

$$A = -0^\circ 51' \quad B = +4^\circ 26' \quad C = -3^\circ 43' \quad D = +3^\circ 57' \quad E = -0^\circ 3'.$$

De plus, pendant que le bâtiment tournait, on a fait, aux deux caps du compas N et N 174° 42', des observations de déviation et de rapports d'intensités de force. Les deux déviations observées ont été respectivement — 4° 48' et + 2° 36'.

Pour les observations de force, on a trouvé qu'à terre l'aiguille aimantée horizontale faisait 133 oscillations en 240 secondes.

A bord, au cap N compas, elle a fait 98,6 oscillations en 180 secondes.

et au cap N 174° 42', elle a fait 89,3 oscillations en 180 secondes

Cela étant, on demande de calculer :

Inconnues. — 1° Les coefficients exacts;

2° Le maximum de la déviation semi-circulaire;

3° L'angle tribord;

4° La force polaire du bâtiment;

5° La quantité λ.

Solution par le calcul.

1° Calcul des coefficients $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$. — Ce calcul sera notablement simplifié par la table des lignes trigonométriques naturelles que nous donnons à la fin de ce volume ; on trouve de suite, avec cette table :

$\mathfrak{A} = \sin A = -0,015$

$\mathfrak{E} = \sin E = -0,0009$; valeur si petite que nous négligerons dorénavant $\mathfrak{E}$

$\mathfrak{D} = \sin D = +0,069$. $\frac{1}{2}\sin D = 0,034$. $1+\frac{1}{2}\sin D = 1,034$. $1-\frac{1}{2}\sin D = 0,966$.

$$\mathfrak{B} = \sin B\left(1+\frac{1}{2}\sin D\right) = 0,0775 \times 1,034 = 0,080$$

$$\mathfrak{C} = \sin C\left(1-\frac{1}{2}\sin D\right) = -0,064 \times 0,966 = -0,063.$$

2° Maximum de la déviation semi-circulaire.

$B = 4°26'$ ou $4,43$ log. $4,43 = 0,64640$ log. $B^2 = 1,29280$ $B^2 = 19,62$

$C = 3°43$ ou $3,72$ log. $3,72 = 0,57054$ log. $C^2 = 1,14100$ $C^2 = 13,84$

$B^2 + C^2 = 33,46$

Log $(B^2 + C^2) = 1,524,53$

Log $\sqrt{B^2+C^2} = 0,76227$ $\sqrt{B^2+C^2} = 5,78$ ou en degrés et minutes $5° 48'$.

3° Angle tribord.

$$\text{Log tg. angle tribord} = \log\frac{\mathfrak{C}}{\mathfrak{B}} = \log\mathfrak{C} - \log\mathfrak{B} = 8,70934_n{}^{1} - 8,90309 = 9,89625_n.$$

L'arc dont la tangente a pour logarithme $+9,89625$ est $+38°,13$. Mais il ne faut pas perdre de vue que $\mathfrak{B}$ est positif, $\mathfrak{C}$ négatif, et que, par suite, la droite qui limite notre angle tribord est dans le quatrième quadrant. Cet angle tribord est donc :

$$360° - 38°13 = 321°,8 = 321°,48'.$$

4° Force polaire du bâtiment, λ H étant pris pour unité.

Force polaire $= \sqrt{\mathfrak{B}^2+\mathfrak{C}^2}$ Log $\mathfrak{C}^2 = 7,59868$ $\mathfrak{C}^2 = 0,003969$

Log $\mathfrak{B}^2 = 7,80618$ $\mathfrak{B}^2 = 0,006400.$

$\mathfrak{B}^2+\mathfrak{C}^2 = 0,010369$

Log $(\mathfrak{B}^2+\mathfrak{C}^2) = 8,01574$

Log $\sqrt{\mathfrak{B}^2+\mathfrak{C}^2} = 9,00787$

d'où, force polaire $= 0,102$.

Calcul de λ. — Nous emploierons pour cela la formule (48).

1. Le signe *n* placé à côté d'un logarithme indique qu'on a changé de signe la quantité négative à laquelle il s'applique, afin de pouvoir appliquer le calcul logarithmique. Il faudra donc avoir soin de changer de signe le résultat final.

Il faut d'abord avoir les valeurs de $\frac{H'}{H}$ qui correspondent à nos observations de nombres d'oscillations. Cherchons, au moyen des nombres donnés, les temps T, t, t'' que met l'aiguille à faire 10 oscillations quand elle se trouve d'abord à terre ; puis, à bord au cap N compas et enfin au cap N 174° 42′ compas.

On nous donne le nombre n d'oscillations faites en θ secondes : il est clair que l'aiguille fera une oscillation en $\frac{\theta}{n}$ secondes, ou 10 oscillations en $\frac{10\,\theta}{n}$ secondes,

d'où :

$$\begin{aligned} \operatorname{Log} T &= \log 2400 - \log 133 = 1{,}25636 \\ \operatorname{Log} t &= \log 1800 - \log 98{,}6 = 1{,}26139 \\ \operatorname{Log} t'' &= \log 1800 - \log 89{,}3 = 1{,}30442. \end{aligned}$$

Calculs relatifs au cap N compas. — Puisque la déviation à ce cap est — 4° 48′, le cap magnétique correspondant que nous désignerons par ζ_0 est égal à N 355° 12′ :

On a :

$$\frac{H'_0}{H} = \frac{T^2}{t^2} \quad \text{or} \quad \log T^2 = 2 \log T = 2{,}51272$$

$$\log t^2 = 2 \log t = 2{,}52278$$

$$\text{d'où } \log \frac{H'_0}{H} = 9{,}98994 \qquad \frac{H'_0}{H} = 0{,}977$$

$$\log \cos \delta_0 = 9{,}99847$$

$$\log \frac{H'_0}{H} \cos \delta_0 = 9{,}99841.$$

$$\begin{array}{lll} \log \mathfrak{B} = 8{,}90309 & \log \mathfrak{C} = 8{,}79934_n & \log \mathfrak{D} = 8{,}83885 \\ \log \cos\zeta_0 = 9{,}99847 & \log \sin\zeta_0 = 8{,}92261_n & \log \cos 2\zeta_0 = 9{,}99388 \\ \log \mathfrak{B}\cos\zeta_0 = 8{,}90156 & \log \mathfrak{C}\sin\zeta_0 = 7{,}72195 & \log \mathfrak{D}\cos 2\zeta^0 = 8{,}83273 \\ \mathfrak{B}\cos\zeta_0 = +0,\ 0797 & \mathfrak{C}\sin\zeta_0 = +0{,}0053 & \mathfrak{D}\cos 2\zeta_0 = 0{,}0680. \end{array}$$

Nous négligerons $\mathfrak{E} \sin 2\zeta_0$, par suite le dénominateur sera,

$$\Sigma = 1 + \mathfrak{B} \cos \zeta_0 - \mathfrak{C} \sin \zeta_0 + \mathfrak{D} \cos 2\zeta_0 = +1{,}1477 - 0{,}0053 = 1{,}1424,$$

$$\log \lambda_0 = \log \frac{H'_0}{H} \cos \delta_0 - \log \Sigma = 9{,}99841 - 0{,}05782 = 9{,}93059$$

$\lambda_0 = 0{,}8523$.

Un calcul identique appliqué au cap $\zeta' =$ N 174° 42′, qui puisque $\delta_2 = +2°\,36'$, correspond au cap magnétique $\zeta =$ N 177° 18′, donnerait $\lambda_1 = 0{,}8073$. Nous prendrons pour λ la moyenne de ces deux valeurs, soit $\lambda = 0{,}830$.

Solution du même problème par la méthode graphique.

On commence par calculer les coefficients exacts.

Cela fait, sur une droite O P (*fig.* 27) qui représentera la direction du Nord magnétique, nous prendrons une grandeur O P arbitraire, mais la plus grande possible pour la commodité et l'exactitude des constructions. Cette grandeur O P nous servira désormais d'unité de longueur et représentera la quantité λ H déjà définie. Nous fixerons plus tard sa valeur comme force magnétique mesurée avec la force magnétique terrestre H prise comme unité.

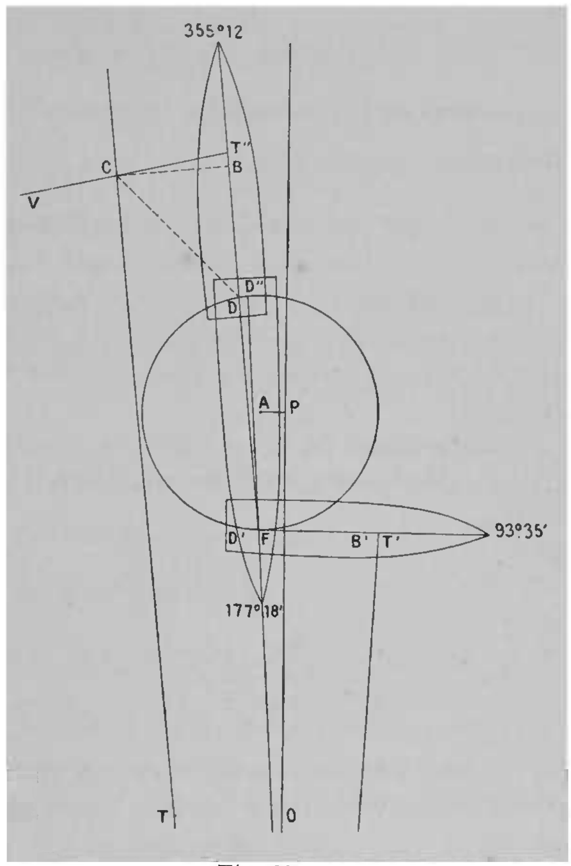


Fig. 27.

En P, élevons une perpendiculaire à O P et, sur cette perpendiculaire, à partir du point P, portons sur la gauche puisque $\mathfrak{A}$ est négatif une longueur égale à la valeur de ce coefficient à l'échelle de la figure; soit 3 millimètres puisque ce coefficient $= 0,015$ et que notre unité est représentée sur la figure par 200 millimètres.

De A comme centre, puisque nous négligeons $\mathfrak{E}$, avec $\mathfrak{D}$ comme rayon, c'est-à-dire avec $200^{mm} \times 0,069$ pour rayon, soit 13,8 millimètres, nous décrirons le cercle directeur.

Sur ce cercle, marquons F, intersection du cercle avec la parallèle à OP menée par A, et point de croisement des caps successifs.

A l'aide du rapporteur, tirons F D dans la direction du cap N

355° 12′; puis à partir de D sur la droite F D et dans la direction de l'avant du bâtiment, puisque $\mathfrak{B}$ est $+$, portons une longueur égale à la valeur de ce coefficient à l'*échelle de la figure* soit $200^{mm} \times 0{,}080 = 16{,}0$ millimètres.

En B, élevons une perpendiculaire au cap F D, et sur cette perpendiculaire, à partir de B et à gauche puisque $\mathfrak{C}$ est négatif, portons $BC = 200^{mm} \times 0{,}063 = 12{,}6$ millimètres.

Force polaire du bâtiment. — Le point C est le point du dygogramme correspondant au cap ζ = N 355° 12′.

En mesurant la ligne DC qui représente $\sqrt{\mathfrak{B}^2 + \mathfrak{C}^2}$ nous trouverons $20^{mm}\,5$, donc la force polaire du bâtiment $= \dfrac{20^{mm}\,5}{200} = 0{,}102$.

Ce qu'on avait trouvé par le calcul d'une façon beaucoup plus longue.

Angle tribord. — En mesurant avec un rapporteur l'angle de la ligne D C avec le cap D B, on trouve 38° 30′ ou pour l'angle tribord : 360° — 38° 30′ = 321° 30′ = 321°,5. On avait trouvé 321°,8 par le calcul.

Détermination de λ. — Enfin, la longueur O C, mesurée avec notre échelle, est égale à 230 millimètres.

Donc :

$$\frac{H'_0}{\lambda H} = \frac{230^{mm}}{200^{mm}} = 1{,}15;$$

il en résulte $\lambda_0 = \dfrac{H'_0}{H} \times \dfrac{1}{1{,}15}$ or $\dfrac{H'_0}{H} = \dfrac{T^2}{t^2} = 0{,}977$; donc $\lambda_0 = 0{,}849$;

nous avions trouvé 0,852 par un calcul fort long.

La même construction appliquée au cap magnétique ζ = N 177° 18′, qui nous fournit le point D″ nous donne :

$$\frac{H'_2}{\lambda H} = \frac{196^{mm}}{200^{mm}} = 0{,}98,$$

et puisque :

$$\frac{H'_2}{H} = \frac{T^2}{t''^2} = 0{,}8014 \quad \lambda_2 = \frac{0{,}8014}{0{,}98} = 0{,}819.$$

Nous avions trouvé par le calcul $\lambda_2 = 0{,}807$.
La moyenne des deux valeurs graphiques est $\lambda = 0{,}834$,
» » calculées était $\lambda = 0{,}830$.

On voit que cette méthode est beaucoup plus rapide que la première. Elle se simplifie encore quand les coefficients sont assez grands pour qu'on puisse se contenter de prendre 10 mill. pour représenter l'unité; on est débarrassé de toutes les multiplications ou divisions par 2 que nous avons été contraints de subir pour rendre la figure plus facile à lire dans ce cas exceptionnellement défavorable pour l'application de la méthode graphique.

Nous allons maintenant donner des exemples de la détermination des coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ dans les deux cas que nous avons indiqués plus haut p. (168-9). De $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, on passera à B et C au moyen des formules (54).

Détermination de B et C par une seule observation de déviation et une seule observation d'intensité de force quand on connaît λ.

Données. — Supposons qu'on ait :

$\mathfrak{A}$, $\mathfrak{E}$, $\mathfrak{D}$; et λ égaux respectivement aux valeurs numériques indiquées précédemment.

On a, de plus, observé au cap magnétique N 355° 12′ la déviation $\delta_0 = -4°\,48'$ et le rapport $\frac{H_0'}{H} = 0{,}977$ qu'on a obtenu, soit par la méthode des oscillations, soit au moyen du déflecteur.

1° Solution par le calcul.

Des deux équations (44) et (45) nous tirons, en négligeant $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$, ce qui est permis à cause de la faible valeur de ces coefficients, et en remplacant X′ et Y′ respectivement par leurs valeurs $H'\cos\zeta'$ et $-H'\sin\zeta'$ (v. page 154) :

$$\mathfrak{B} = \frac{H'}{\lambda H}\cos\zeta' - (1+\mathfrak{D})\cos\zeta$$

$$\mathfrak{C} = -\frac{H'}{\lambda H}\sin\zeta' + (1-\mathfrak{D})\sin\zeta.$$

On a le cap au compas ζ', la déviation observée permet de passer au cap magnétique correspondant ζ, toutes les autres quantités sont connues par hypothèse, le calcul n'offre donc aucune difficulté.

Dans le cas qui nous occupe :

$$\mathfrak{B} = \frac{0{,}977}{0{,}849}\cos 0° - (1+0{,}069)\cos 355°\,12' = 0{,}081$$

$$\mathfrak{C} = \frac{0{,}977}{0{,}849}\sin 0° + (1-0{,}069)\sin 355°\,12' = -0{,}074.$$

On retrouve ainsi, à peu de chose près, les valeurs de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ trouvées tout à l'heure, mais nous avons négligé, non seulement $\mathfrak{E}$, mais encore $\mathfrak{A}$ pour simplifier le calcul. Et cette dernière simplification n'est pas toujours permise.

On calcule ensuite B et C par les formules (54).

2° Méthode graphique.

Calculons $\frac{H'_0}{\lambda H} = \frac{0,977}{0,849} = 1,15$, nous aurons ainsi la longueur OC qu'on doit porter sur la ligne OT, dont la direction est donnée par la déviation observée $\delta_0 = -4° 48'$ valeur de l'angle que fait OT avec OP. Le point C étant ainsi obtenu, il suffira d'abaisser de ce point une perpendiculaire sur la ligne FD qui représente la direction du cap v. p. (168).

Soit B le point d'intersection de cette perpendiculaire avec le cap. La longueur D B représentera la grandeur du coefficient $\mathfrak{B}$ dont le signe sera donné par le sens de D B par rapport à l'avant du bâtiment, + si D B est dirigé vers l'avant; — si cette ligne est dirigée vers l'arrière.

De même la longueur B C représente la valeur du coefficient $\mathfrak{C}$ qui sera négatif si cette longueur est dirigée vers bâbord quand l'observateur regarde l'avant, et positif si elle est dirigée vers tribord.

Application de ce problème à la mer. — Dans bien des circonstances, le navire est assez tranquille et assez droit à la mer pour qu'on puisse observer le nombre des oscillations de l'aiguille aimantée dans un temps donné par un compteur à secondes. Mais on ne peut alors avoir directement le temps du même nombre d'oscillations de la même aiguille sous l'influence de la force terrestre, qu'en mettant à la mer un radeau ou un canot, dont les ferrures n'aient aucune action sur l'aiguille aimantée; ce dont on peut s'assurer avant le départ, en constatant que la déviation observée dans le canot à plusieurs caps, quatre au moins, est nulle ou fort petite, plus petite que 2 degrés, par exemple, et que le temps de 10 oscillations de l'aiguille y est le même qu'à terre. Or, la mise d'un canot à la mer est une opération qui prend du temps et qu'on n'aime point à faire quand on n'y est pas impérieusement obligé : il serait donc préférable de se procurer le nombre des données nécessaires en faisant une seconde observation de déviation à un autre cap. Fort heureusement, on peut se passer de cette observation complémentaire quand on a une bonne carte donnant l'intensité de la force horizontale terrestre dans les différentes parties du globe.

En effet, à terre, au départ, on sait par l'observation que l'aiguille aimantée fait 10 oscillations en T secondes sous l'action de la force magnétique H.

Par suite, à l'endroit où l'on se trouve, et pour lequel la carte indique la force magnétique H_1, le temps x de 10 oscillations de l'aiguille aimantée sera donné par la formule :

$$\frac{H}{H_1} = \frac{x^2}{T^2} \quad \text{d'où} \quad x^2 = T^2 \frac{H}{H_1}.$$

Cette quantité x est précisément la quantité dont nous avions besoin pour déterminer le rapport $\frac{H'}{H_1}$ au cap unique où l'on veut observer à bord.

La précision du résultat, le degré de confiance qu'on devra avoir en lui, dépendent évidemment de la valeur même de la carte.

On obtient, en une minute, le même rapport au moyen du déflecteur quand on a eu la précaution de graduer son échelle comme nous le dirons dans la quatrième partie.

En effet, on a noté, au départ, les valeurs des forces magnétiques qui correspondent aux diverses divisions de l'échelle et aussi la division qui correspond à l'écart de 90 degrés obtenu à terre. Les cartes magnétiques donnent H_1, au lieu où se trouve le bâtiment, et il suffit, au cap suivi par le navire, d'observer la division de l'échelle qui correspond à un écart de la rose égal à 90 degrés. La graduation de l'échelle indique que cette division correspond à une force H'. On a donc le rapport cherché $\frac{H'}{H_1}$, et comme λ est une constante que l'on doit emporter avec soi (v. p. haut), une seule observation de variation faite à ce cap permettra, d'après ce que nous venons de voir, de calculer $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, d'où B et C, et, par suite, une table de variations complète.

Si l'échelle du déflecteur n'avait pas été graduée avant le départ, on se servirait alors de cet instrument de la façon suivante :

On doit toujours avant le départ, noter en même temps que λ la division de l'échelle du déflecteur qui, à terre, correspond à un écart de la rose égal à 90 degrés.

Les cartes magnétiques donnent H_1 ; donc on sait, d'après un théorème énoncé dans la première partie, que, si on mettait l'index du déflecteur sur la même division qu'au point de départ, tout en laissant le pointeur sur la ligne Est de la rose déviée, on obtiendrait, sous la seule action magnétique terrestre au lieu où l'on se trouve, un écart α, tel que[1] :

$$\frac{H}{H_1} = \frac{\sin \alpha_1}{1}.$$

On peut donc calculer cet angle α_1. Ceci posé, à bord, au cap que l'on suit, on observe l'écart α' qu'on obtient pour la rose quand l'écartement des aimants et la position du pointeur sont respectivement les mêmes que tout à l'heure, et en appelant H' la force directrice de l'aiguille correspondant à ce cap, on a alors :

$$\frac{H'}{H_1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha'},$$

équation qui détermine le rapport nécessaire pour trouver B et C au moyen de la seule observation de la variation au cap couru par le navire.

Détermination de B et C au moyen de deux observations de déviations sans connaître λ.

1° Solution par le calcul.

Elle est donnée par l'équation générale 9 *bis* (p. 64) de la première partie, qui donne, au moyen des deux observations de δ faites à des caps connus, deux relations entre les coefficients cherchés $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$.

Les calculs n'offrent aucune difficulté, mais ils sont fort longs et entraînent, par suite, de grandes chances d'erreurs, même quand les coefficients $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ sont négligeables, ce qui les simplifie pourtant d'une manière notable. Nous ne conseillons donc pas d'adopter cette solution dans la pratique ; il est préférable d'employer la méthode graphique.

2° Méthode graphique (*fig.* 27).

C'est l'application de la Méthode donnée plus haut (v. 3e cas page 169) pour la détermination de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$.

Prenons les données numériques précédentes pour $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$, et supposons que, n'ayant pas λ, nous ayons observé aux deux caps :

$$\zeta' = 0 \text{ et } \zeta' = 90°,$$

les deux déviations :

$$\delta_0 = -4° 48' \text{ et } \delta_1 = 3° 35'.$$

1. Ceci suppose $H_1 > H$. Quand l'inégalité est renversée, on trouve facilement la valeur du rapport. (Voir 5e partie.)

Ces déviations nous permettent de passer des caps au compas aux caps magnétiques correspondants qui sont respectivement N 355° 12′ et N 93° 35′.

Soit F D, la ligne qui correspond au premier cap, O T la ligne qui se rapporte à la déviation correspondante, et T le point d'intersection de ces deux lignes.

Soit de même T′ le point d'intersection des deux lignes analogues pour le second cap, F D′ et O T′.

Les nécessités de l'impression nous ont obligé à ne donner que la partie supérieure de la figure. Il ne faut donc pas perdre de vue que O est situé sur OP à une distance de P égale à 20 centimètres, que le point T se trouve à la rencontre de la ligne F D avec la droite O C telle que l'angle C O P est égal à 4° 48′ du côté de l'Ouest, puisque δ est négatif.

Prenons sur D T à partir de D, et dans un sens qui sera déterminé par celui de la droite D′ T′ relativement au cap F D′, une longueur D T″ $=$ D′ T′, et par T″ menons T″ V tel que angle D T″ V $=$ angle D′ T O.

L'intersection des droites O T et T″ V sera le point C de la *fig.* 27 et pour avoir $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, il suffira de mener, par ce point, une perpendiculaire à la direction F D du premier cap. Les valeurs absolues et les signes des coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ s'obtiendront alors comme dans le paragraphe précédent et en vertu des mêmes conventions.

On voit aussi qu'il n'est pas besoin que les deux points d'intersection T et T′ soient à la fois dans les limites de la figure, un seul suffit. De $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, on passera ensuite à B et C par les formules (54), page 163.

CHAPITRE VII

DÉVIATION DUE A LA BANDE

Nous avons vu, dans la première partie, que si on appelle δ la déviation du compas au cap ζ' quand le navire est droit, la déviation δ_i quand le navire s'incline d'un angle i (compté positivement si le navire est incliné sur tribord et négativement s'il est incliné sur bâbord) est donnée par la formule (21) (1re partie).

Pour une bande donnée, i est défini en grandeur et en signe, c'est une constante : nous voyons donc que la bande a pour effet de changer la déviation observée et d'introduire dans l'expression de cette quantité trois termes correctifs :

1° Un terme constant analogue à A soit $\frac{c-g}{2\lambda}i$;

2° Un terme de déviation semi-circulaire $Ji \times \cos\zeta'$, qui s'ajoute à l'ancien terme en C;

3° Enfin un terme de déviation quadrantale $-\frac{c+g}{2\lambda}\cos 2\zeta'$, qui s'ajoute à l'ancien terme en E.

On se rend facilement compte du premier et du troisième terme en remarquant que, dans le cas du navire droit, les coefficients $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ n'étaient nuls que dans le cas de symétrie parfaite du fer doux par rapport au plan longitudinal. Or, dès que le navire s'incline, cette symétrie, à supposer qu'elle existât préalablement, disparaît aussitôt par le fait du déplacement des barreaux c et g qui sortent tous deux du plan vertical longitudinal.

Ces deux termes réunis ont, nous le verrons tout à l'heure, beaucoup moins d'influence que le terme $J\,i\cos\zeta'$.

Coefficient de l'erreur due à la bande. — Ce dernier, quand la bande est de 1 degré seulement, se réduit à $J\cos\zeta'$. Nous appellerons dorénavant J le coefficient de l'erreur due à la bande, bien qu'en réalité cette erreur se compose encore des deux autres termes que nous négligeons.

Par des transformations convenables, l'équation (21) a été mise sous la forme (24), ou en posant, pour suivre des notations fréquemment employées en Angleterre : (voir page 86).

$$J\,i\cos\zeta' = H_1 \quad -\frac{g}{\lambda}i\cos^2\zeta' = H_2 \quad \text{et}\ \frac{c}{\lambda}i\sin^2\zeta' = H_3.$$

$$\delta_i = \delta + H_1 + H_2 + H_3. \tag{57}$$

Examen des trois termes correctifs introduits par la bande.

2° De H_2. — D'après la signification de g dans les équations qui donnent les composantes des forces magnétiques suivant les trois axes, on voit que ce terme est dû à la force induite perpendiculaire au pont qui provient de l'action exercée par la composante terrestre parallèle à la quille, sur le fer doux horizontal ayant la même direction.

Pour une valeur donnée de i, H_2 est maxima pour les caps Nord ou Sud; et nulle pour les caps Est ou Ouest.

En général, $\frac{g}{\lambda}$ n'a de valeur sensible que pour les compas placés très près, soit de l'avant, soit de l'arrière. Pour un compas situé à peu près au milieu du navire, $\frac{g}{\lambda}$ a des valeurs absolues qui atteignent rarement 0,1 et, par suite, le maximum de l'erreur que ce terme introduit est alors de 6 minutes par degré de bande, donné quand le navire a le cap au Nord du compas. Mais cette erreur diminue rapidement quand le cap change à cause du facteur $\cos^2 \zeta'$.

2° De H_3. — Ce terme est dû à la force induite parallèle à la quille qui provient de l'action exercée par la composante verticale terrestre sur le fer doux vertical placé dans le plan longitudinal du navire.

Cette erreur est maxima aux caps Est ou Ouest, et nulle aux caps Nord ou Sud.

Quant à sa valeur absolue, elle est comparable en général à celle du terme précédent, à moins que le compas ne soit placé trop près de pièces de fer verticales d'un diamètre considérable, mâts, cheminée, manche à air.

Cette erreur diminue rapidement quand le cap s'écarte de l'Est ou de l'Ouest, puisqu'elle dépend de $\sin^2 \zeta'$.

De H_1. — C'est le terme le plus important de l'erreur due à la bande. En général, les deux autres sont négligeables et on le considère seul. (voir page 86).

Reportons-nous à la valeur de J donnée par la formule (22), remplaçons tang θ par $\frac{Z}{H}$ et rappelons-nous que l'angle i, qui figure dans H_1, doit être remplacé en toute rigueur par $\sin i$ dont il tient la place en vertu d'une simplification basée sur sa petitesse (v. p. 86). Nous aurons :

$$H_1 = \frac{1}{\lambda H} e \sin i \times Z - \frac{1}{\lambda H} k \sin i \times Z - \frac{1}{\lambda H} \times R \sin i,$$

et sous cette forme, on voit :

1° Que le premier terme de H_1 représente la déviation que produirait, sur une aiguille aimantée déjà soumise à la force directrice moyenne λH, la force horizontale développée par la composante verticale terrestre Z agissant sur la tige transversale e, inclinée d'un angle i sur l'horizon ;

2° Que le deuxième terme de H_1 représente la déviation que produirait sur une aiguille aimantée soumise à λ H, la force horizontale développée par la composante verticale terrestre Z agissant sur une tige k faisant un angle i avec la verticale ;

3° Que le troisième terme exprime la déviation produite dans les mêmes conditions par la composante horizontale donnée par l'aimant R faisant un angle i avec la verticale.

Des signes de J et de l'erreur due à la bande. — On peut, en général, avoir quelque indice sur le signe de J en examinant séparément le signe et la valeur absolue que peuvent avoir chacune des trois quantités qui le composent, d'après les conditions particulières où l'on se trouve placé.

On met pour cela J sous la forme :

$$J = \frac{e-k}{\lambda}\tan\theta - \frac{R}{\lambda H}.$$

En général, $e-k$ est toujours négatif et ne varie pas quand le bâtiment se déplace.

D'ailleurs, dans les bâtiments construits dans l'hémisphère Nord R est, en général, positif.

Par suite, si le navire navigue dans l'hémisphère Nord où tang θ est positive, le coefficient J sera négatif.

Quand ce même navire passera dans l'hémisphère Sud, tang θ deviendra négative, et en admettant que R ne change pas de signe, J deviendra positif dès que $\frac{e-k}{\lambda}$ tang θ sera plus grand que $\frac{R}{\lambda H}$.

L'erreur due à la bande est égale à $+ J i \cos \zeta'$; or, quand J est négatif et que cos ζ' est positif, ce qui a lieu pour tous les caps du navire compris entre l'Est et l'Ouest en passant par le Nord, l'erreur due à la bande est de signe contraire à celui de i, c'est-à-dire que l'aiguille est attirée du côté du vent. Quand cos ζ' est négatif, l'erreur due à la bande a le même signe que i, et un croquis facile à faire montre que cette erreur est encore produite par une attraction de la pointe Nord de l'aiguille du côté du vent.

C'est pour cela qu'on appelle parfois la quantité — J, le coefficient de l'erreur due à la bande du côté du vent. Tandis que cette erreur elle-même est égale à $- J i \cos \zeta'$.

Autre forme du coefficient J. — Les deux formes que nous avons données jusqu'ici pour le coefficient J ne permettent pas de le calculer, parce que l'on n'a ni R ni k en admettant que l'on ait pu calculer e, si on a déterminé $\mathfrak{D}$ et λ (v. p. 160). Et ce n'est pas le cas ordinaire, puisque, jusqu'à présent, on ne fait pas, en général, à bord, les observations de rapports d'intensités nécessaires pour avoir λ.

En remplaçant dans la valeur de J, e par sa valeur $(\lambda - 1) - \lambda \mathfrak{D}$. et $k + \frac{R}{Z}$ par $\mu - 1$, on aura :

$$(58) \qquad J = -(\mathfrak{D} + \frac{\mu}{\lambda} - 1) \operatorname{tang} \theta\,;$$

qui est la forme la plus commode pour le calcul de J.

Calcul de J sans mettre le navire à la bande.

Nous avons donné déjà, dans la deuxième partie (ch. VII), un moyen pratique d'obtenir la valeur de J en mettant le navire à la bande ; nous allons montrer maintenant comment on peut avoir ce coefficient, en laissant le navire droit pourvu qu'à la connaissance des deux quantités $\mathfrak{D}$ et λ on joigne celle de la quantité μ.

Détermination de μ. — μ est donné par la formule (23) de la première partie, on a d'ailleurs d'après la formule (39) que nous rappelons ici :

$$(39) \qquad \frac{Z'}{Z} = \frac{g}{\operatorname{tang} \theta} \cos \zeta - \frac{h}{\operatorname{tang} \theta} \sin \zeta + \mu.$$

En se rappelant la méthode employée pour calculer A, B, C, D, E (v. p. 129) qui est fondée sur les propriétés des sommes de sinus et de cosinus d'arcs en progression arithmétique, on voit que, si on donne à ζ des valeurs équidistantes angulairement dans l'espace et non sur la rose, et qu'on additionne toutes les équations correspondant à un tour complet d'horizon, μ n'est autre chose que la moyenne des valeurs que prend $\frac{Z'}{Z}$ quand le cap du navire décrit la rose entière.

La formule montre encore que μ est la moyenne des valeurs que prend $\frac{Z'}{Z}$ à deux caps diamétralement opposés, ce qui permet de le déterminer facilement quand le navire change d'évitage cap pour cap sous l'influence de la marée.

Simplification quand $h = 0$. h provient du fer doux perpendiculaire à la quille qui n'est pas symétrique par rapport au plan diamétral longitudinal et se trouve, avec le pivot du compas, dans un même plan transversal, (v. pl. I). En général h est nul et, dans tous les cas, assez petit pour qu'on puisse le négliger *à priori ;* on voit donc qu'une seule observation de $\frac{Z'}{Z}$ faite au cap Est ou Ouest magnétique suffit pour donner μ, même si l'on n'a pas le coefficient g et si celui-ci est connu, une observation de $\frac{Z'}{Z}$ à un cap quelconque suffira pour avoir μ.

Détermination de $\frac{Z'}{Z}$. — Nous ramenons donc la connaissance de μ à celle de $\frac{Z'}{Z}$, c'est-à-dire à la connaissance d'un rapport d'intensités de forces verticales.

Nous avons donné, dans l'introduction, deux méthodes différentes pour obtenir ce rapport au moyen de l'aiguille d'inclinaison.

Calcul de μ. — 1° Sans aucune hypothèse faite sur h. — Quand on ne fait aucune hypothèse sur la valeur de h, on détermine la valeur $\frac{Z'}{Z}$ à des caps équidistants, on fait la somme de toutes les valeurs ainsi obtenues, et on divise par le nombre des observations faites,

et on a :
$$\mu = \frac{\Sigma \frac{Z'}{Z}}{n}.$$

Dans la pratique, il suffira de faire deux observations de la valeur de ce rapport à des caps diamétralement opposés, et on aura :

$$\mu = \frac{1}{2}\left(\frac{Z'_1}{Z} + \frac{Z'_2}{Z}\right).$$

2° En supposant $h = 0$ et g inconnu. — On observe le rapport $\frac{Z'}{Z}$ à deux caps magnétiques ζ_1 et ζ_2. Et l'équation (39), appliquée à ces deux observations, donne pour les inconnues μ et $\frac{g}{\tang\theta}$ les valeurs suivantes :

$$\mu = \frac{\frac{1}{2}\left[\frac{Z'_1}{Z}\cos\zeta_2 - \frac{Z'_2}{Z}\cos\zeta_1\right]}{1/2\,(\cos\zeta_2 - \cos\zeta_1)} \qquad \frac{g}{\tang\theta} = \frac{\frac{1}{2}\left[\frac{Z'_1}{Z} - \frac{Z'_2}{Z}\right]}{1/2\,(\cos\zeta_1 - \cos\zeta_2)}.$$

Si dans ce cas où $h = 0$, on peut observer au cap Est ou Ouest magnétiques, alors $\cos\zeta = 0$, g disparaît de la formule et on a :

$$\mu = \frac{Z_e'}{Z}$$

en appelant Z_e' la valeur particulière de Z' à ce cap.

3° En supposant $h = 0$ et g connu. — Dans ce troisième cas, une seule observation de $\frac{Z'}{Z}$ faite à un cap quelconque, nous donnera en vertu de l'équation (39) simplifiée,

$$\mu = \frac{Z'_1}{Z} - g . \cos\zeta . \operatorname{cotang}\theta.$$

Méthode graphique pour déterminer μ et g (*fig.* 28). — Son utilité. — Dès que les observations de $\frac{Z'}{Z}$ ne sont plus faites à des caps magnétiques équidistants, ou dans les conditions particulières que nous venons d'énumérer, la détermination de μ et g par la résolution des équations données par l'équation fondamentale (6) devient si longue et si compliquée qu'elle ne peut guère servir dans la pratique.

Quand donc on veut se servir d'observations faites en nombre quelconqne, et à des caps quelconques, il faut employer la méthode graphique.

L'équation (39) où nous supposerons $h = 0$ devient :

$$(59) \quad \frac{Z}{Z'} = \frac{g}{\operatorname{tang}\theta} \cos\zeta + \mu.$$

Dans cette équation μ, g, θ sont des constantes, $\frac{Z'}{Z}$ et $\cos\zeta$ des variables qui n'entrent chacune dans l'équation qu'au premier degré; si donc on donne à l'une d'entre elles, $\cos\zeta$, des valeurs quelconques qu'on représentera par des longueurs portées sur une droite à partir d'une même origine, qu'on élève à l'extrémité de chacune de ces longueurs une perpendiculaire sur laquelle on portera une longueur proportionnelle à la valeur correspondante de $\frac{Z'}{Z}$, l'ensemble des points ainsi obtenus sur cbaque perpendiculaire formera une droite que nous construirons de la manière suivante :

Prenons (*fig.* 28), deux axes de coordonnées rectangulaires Cx et Cy. De l'origine C, décrivons une circonférence avec un rayon arbitraire, aussi grand que possible et que le comporteront les constructions qu'on doit faire sur le papier : ce rayon représentera la valeur de la composante verticale Z de la terre, pour le lieu de l'observation et nous servira désormais d'unité de longueur.

Ici où la figure est destinée simplement à faciliter l'exposition, nous avons pris pour la commodité de l'impression une échelle beaucoup trop petite, puisque le rayon de notre circonférence qui représente Z ou l'unité de longueur n'a que $0^m,025$. La circonférence nous représentera la rose des vents.

Sur l'axe des x plaçons les deux points cardinaux Nord et Sud, l'un à gauche, l'autre à droite du centre en N et en S. — Les deux points cardinaux Est et Ouest seront, par conséquent, sur Cy en E et O.

Pour avoir le point Q de la droite cherchée qui correspond à l'azimut $\zeta = N\,54\,O$, nous mènerons le rayon CA tel que l'angle $NCA = 54$ degrés comptés du Nord vers l'Ouest. Du point A nous abaisserons une perpendiculaire AP sur l'axe des x, CP n'est autre chose que $\cos\zeta$: puis sur A P et à partir de P, nous porterons, dans un sens convenable, la longueur P Q qui représente la valeur trouvée à ce cap pour $\frac{Z'}{Z}$; c'est-à-dire qu'on portera cette valeur au-dessus de ox si elle est positive ; au-dessous si elle est négative, ce qui arrive quand Z' composante verticale de la force émanée de la terre et du navire est de sens contraire à la force verticale terrestre Z. On est averti qu'on se trouve dans ce cas parce qu'alors le pôle inférieur de l'aiguille d'inclinaison qui est à terre le pôle rouge ou austral est, au contraire, à bord le pôle bleu ou boréal.

On obtient, de même, les points qui correspondent aux autres caps. Si les observations étaient faites avec une exactitude rigoureuse, tous ces points se trouveraient exactement sur une droite; comme il ne peut en être ainsi, on prendra, pour la droite cherchée, celle qui passera à travers tous ces points en s'écartant d'eux le moins possible.

Cette droite construite, rien de plus facile que d'avoir μ et g.

En se reportant à l'équation (59), il est évident que la valeur de μ est donnée, soit par l'ordonnée CM de la droite qui correspond à : $\zeta = 90$ ou $\zeta = 270$; soit par la demi-somme des ordonnées N R et S T qui correspondent l'un à $\zeta = 0$ et l'autre à $\zeta = 180$ degrés.

On voit de même que la valeur de $\frac{g}{\operatorname{tang}\theta}$ n'est autre chose que la moitié de la différence de ces deux dernières ordonnées.

Application de la méthode graphique (v. *fig.* 28). — Nous avons appliqué cette méthode aux données obtenues à Portsmouth, à bord du navire de guerre anglais *Orontes*.

On avait observé, à bord de ce navire et aux caps N 3 E, S 26 O et N 54 O, des valeurs de $\frac{Z'}{Z}$ égales respectivement : 1° à 1,172; 2° à 1,141; 3° à 1,196. On avait d'ailleurs tang $\theta = 2{,}5$.

La construction de la figure (28) et la mesure des ordonnées nécessaires donne, en dix minutes environ,

$$\mu = 1{,}15 \text{ et } g = 0{,}050.$$

Dans le *Manuel de l'amirauté anglaise*, qui nous a fourni ces don-

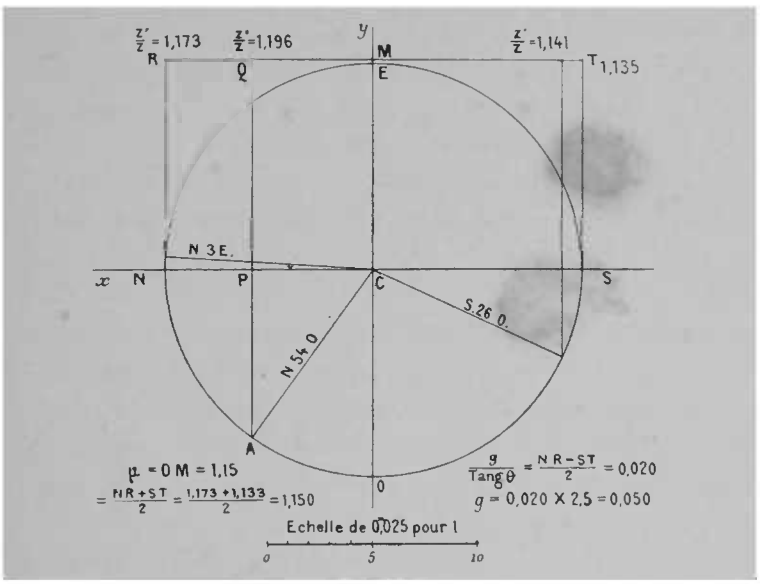


Fig. 28.

nées, on n'a pas employé cette méthode. On a déterminé ces mêmes coefficients par le calcul qui est très long et, par suite, renferme de nombreuses causes d'erreurs; ce calcul a donné :

$$\mu = 1{,}164 \text{ et } g = 0{,}057.$$

Ces différences sont insignifiantes dans la pratique, et on les aurait probablement atténuées, si les nécessités de l'impression ne nous avaient contraint de prendre, pour la circonférence, un rayon aussi petit.

Exemple de calcul de J. — Ayant μ, le calcul de J s'effectue sans difficulté par la formule (25) :

si $\mu = 1{,}164$ $\quad \mathfrak{D} = +0{,}096 \quad \lambda = 0{,}875 \quad \text{tang}\,\theta = 2{,}5,$ on aura :

$$J = -\left[0{,}096 + \frac{1{,}164}{0{,}875} - 1\right] \times 2{,}5 = -1{,}065.$$

Ce qui veut dire que pour chaque degré de bande la déviation subit par la bande un changement de — 1°,065 soit en nombres ronds — 1°04′.

Utilité de la détermination de g. — La valeur de g n'est pas nécessaire pour calculer celle de J, mais il est néanmoins bon d'avoir cette quantité, parce que l'on sait alors si l'on peut négliger à bon droit le terme correctif de l'erreur due à la bande qui le contient.

Quand $\frac{g}{\lambda}$ n'est que de 0,05 en valeur absolue, on peut négliger ce terme correctif. Mais, dès qu'il atteint 0,1, il en faut tenir compte au moins pour tous les caps qui sont situés à moins de 45 degrés du Nord et du Sud.

Détermination simultanée de g et c. — C'est pour la même raison qu'il est bon d'avoir la valeur de c.

Les deux systèmes de valeurs des coefficients exacts qui correspondent au cas où le navire est incliné successivement d'un angle i puis d'un angle i' nous donneraient d'après les formules (20) de la première partie :

$$(60)\qquad \left\{\begin{aligned} \frac{c}{\lambda} &= \frac{1}{i-i'}\left\{\mathfrak{A}_i - \mathfrak{A}_i' - \mathfrak{E}_i + \mathfrak{E}_i'\right\} \\ \frac{g}{\lambda} &= \frac{1}{i-i'}\left\{-\mathfrak{A}_i + \mathfrak{A}_i' - \mathfrak{E}_i + \mathfrak{E}_i'.\right\} \end{aligned}\right.$$

Mais, outre que le calcul de ces doubles coefficients est assez long, le fait que la simple rotation du navire suffit à donner à $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ des valeurs apparentes (v. première partie, p. (79), erreur de Gaussin.) rend ce mode de détermination illusoire quand on n'est pas sûr d'avoir obtenu les coefficients avec une grande approximation.

Il est donc préférable, pour avoir g, de l'obtenir par la méthode graphique donnée plus haut.

Détermination de c. — Quant à c, le moyen le plus pratique de le déterminer, c'est de séparer les deux parties du coefficient $\mathfrak{B}$ comme nous l'avons montré p. (69), en observant à deux endroits différents. On peut encore l'obtenir d'une autre manière. Pour cela, on emploie la formule (24) p. 86.

Supposons qu'au cap Est ou Ouest du compas, c'est-à-dire pour $\zeta' = 90$ ou 270 degrés, on incline le bâtiment d'un angle i, tout en le forçant à garder le même cap au compas; on a alors, d'après la formule citée et puisque $\cos \zeta' = 0$:

$$(61)\qquad \delta_i = \delta + \frac{c}{\lambda}\, i.$$

De même que pour le terme en g, on devra tenir compte du terme correctif en c, dès que la valeur de $\frac{c}{\lambda}$ dépassera 0,05 en valeur absolue, et avec d'autant plus de soin que la route est plus voisine de l'Est ou de l'Ouest.

On peut déterminer g comme nous venons de déterminer c, mais cette fois en mettant le navire à la bande sur l'un des deux caps Nord ou Sud du compas.

Il est utile de faire ces deux déterminations car, seules, elles peuvent faire connaître l'importance des deux termes correctifs qu'on néglige aujourd'hui à tort sans aucun examen préalable.

CHAPITRE VIII

DES VALEURS DES DIFFÉRENTS COEFFICIENTS ET PARAMÈTRES

Ces valeurs dépendent non seulement du bâtiment, de son mode de construction et d'armement, mais encore et surtout de la place particulière occupée par le compas à bord. Il ne faut donc pas attacher une trop grande importance aux tableaux dans lesquels on trouve les valeurs de ces différentes quantités trouvées pour un certain nombre de bâtiments. Nous donnerons cependant un résumé sommaire des indications trouvées dans les tableaux publiés en Angleterre et en Allemagne (les documents de ce genre manquant encore en France). On aura ainsi une idée des valeurs que l'on rencontre d'ordinaire dans la pratique, et si par hasard on en trouvait de notablement différentes, on serait averti qu'il faut les vérifier avec soin par de nouveaux calculs ou de nouvelles observations.

Nous commencerons par l'étude détaillée des deux coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$.

ÉTUDE PLUS COMPLÈTE DES COEFFICIENTS $\mathfrak{B}$ ET $\mathfrak{C}$.

Au moyen des calculs indiqués page 69, le captain E. W. Creak de la marine royale anglaise a étudié les valeurs de ces deux coefficients et de leurs parties constituantes, à bord de vingt-cinq navires de guerre anglais, de différents types. Ce travail a été publié dans les Transactions Philosophiques de 1883. En voici le résumé très succinct.

Le calcul des coefficients P et Q effectué, à différents intervalles, dans un même lieu, montre que leurs valeurs varient un peu avec le temps et d'autant plus que l'on est dans une période plus rapprochée du lancement du navire. Ces changements sont d'ailleurs très faibles. L'examen des valeurs de ces coefficients à bord des navires de guerre de différentes espèces, cuirassés, navires en fer, ou en bois et fer, a montré que dans le cas le plus défavorable, dans un même navire, la valeur de P a varié de 0,015 en un an, — en général il faut deux ou trois ans pour avoir une variation moitié moindre. Q varie comme P avec le temps mais ses changements sont de moindre importance, car les variations de P et Q sont surtout importantes parce qu'elles ont pour conséquence des variations correspondantes dans les valeurs de c et de f, or les valeurs de ce dernier coefficient à bord des différents bâtiments sont en général négligeables.

Pour ces divers bâtiments, les valeurs de P sont comprises en valeurs absolues, entre 0,06 et 0,420; celles de Q entre 0,01 et 0,215; celles de c entre 0,02 et 0,110; celles de f entre 0 et 0,013.

Les valeurs de $\sqrt{P^2+Q^2}$ sont comprises entre 0,04 et 0,54, celles de $\sqrt{c^2+f^2}$ entre 0,002 et 0,110.

Les valeurs d'une même quantité, à bord de bâtiments de même type, varient beaucoup entre elles et cela se comprend puisqu'elles dépendent surtout de la place occupée par le compas. Comme la partie de la déviation semi-circulaire qui provient de P et Q varie seulement avec H, c'est-à-dire très peu, tandis que celle qui provient de c et f varie avec la tangente de l'inclinaison et par suite dans des proportions considérables, on voit que quand on est contraint d'accepter, pour un compas déterminé, une valeur considérable de l'une ou l'autre de ces deux quantités, il vaut mieux choisir la place de façon à avoir une valeur de $\sqrt{c^2+f^2}$ aussi faible que possible.

La quantité $\sqrt{\mathfrak{B}^2+\mathfrak{C}^2}$ représente la moyenne de la force horizontale exercée, sur l'aiguille, par le fer qui produit la déviation semi-circulaire ; le plus souvent inférieure à 0,3 elle atteint assez fréquemment 0,4 et rarement 0,5 ou 0,6. On voit encore ici l'avantage de la compensation partielle qui, en annulant ou à très peu près cette quantité, annule également les variations de la force directrice de l'aiguille aimantée qu'elle produit.

Sur l'axe magnétique du bâtiment. — On appelle parfois ainsi la direction de la résultante des deux forces P et Q dues au magnétisme permanent du navire. Définissons cette direction au moyen d'un angle tribord défini comme celui de la force polaire du navire, c'est-à-dire par un angle α dont la tangente trigonométrique sera, dans ce cas, égale à $\frac{Q}{P}$.

Si nous comparons (comme l'a fait M. le capitaine Koldewey dans un travail sur lequel nous allons revenir) cet angle à celui qui existait pendant la construction du navire entre la direction de la quille et la direction Sud du méridien magnétique, on trouve que ces deux angles sont à très peu de chose près égaux, et ne diffèrent, dans les cas les plus défavorables signalés dans ce travail, que de 15 à 18°.

Il semble donc qu'on puisse dire qu'en général c'est le cap de construction qui détermine la direction de l'axe magnétique.

Désaccord entre la Théorie et l'Expérience. — Nous avons dit, à la fin de la première partie, que si, dans un lieu donné, on calcule les déviations au moyen des valeurs de B et C déduites de celles de 𝔅 et ℭ et qu'on les compare aux valeurs obtenues par des observations de variations, on trouvait entre les deux valeurs de la déviation, au même cap, des différences qui atteignaient parfois 3° et 4° M. le capitaine Koldewey dans un travail remarquable inséré au n° 4 de l'année 1879 des Archives de l'observatoire de la Marine à Hambourg, dirigé par M. Neumayer, a cherché et trouvé les causes de ce désaccord et donne ainsi les moyens de le faire disparaître.

Remarquons, en effet, que les formules dont nous nous sommes servis jusqu'ici ont été obtenues dans l'hypothèse que le fer du navire était complètement et nettement partagé en fer parfaitement dur et en fer parfaitement doux. Une division aussi absolue ne saurait être, nous l'avons déjà dit, que purement théorique.

Il est donc naturel qu'il y ait un désaccord entre la théorie et l'observation, puisque nous n'avons pas tenu compte de l'influence particulière que doit nécessairement exercer le fer qui, au point de vue magnétique, se trouve dans un état intermédiaire entre celui du fer doux et celui du fer dur.

Voici comment M. le capitaine Koldewey a évalué cette influence perturbatrice.

Au moyen des données relevées sur les livres de bord, il a dressé le tableau des différences trouvées entre les valeurs des coefficients

B et C suivant qu'on les obtient exclusivement par le calcul ou par l'observation. Il a constaté que ces différences sont d'autant plus grandes dans les mêmes parages que le navire avait suivi pendant plus longtemps pour y arriver une même route, et dans des parages différents que, toutes choses égales d'ailleurs, la latitude magnétique est plus élevée. De plus les signes de ces différences suivent une loi déterminée. Ainsi, la différence entre la valeur de B observée et la valeur calculée du même coefficient est positive si la route suivie pendant un ou plusieurs jours était une route Sud; elle est négative si cette route était Nord.

La différence entre la valeur de C observée et la valeur calculée est de même, positive après les routes Est, et négative après les routes Ouest.

Les faits s'expliquent si on suppose, ce qui est vraisemblable, que sous l'influence des vibrations de la coque dues aux chocs des vagues, à la rotation de l'hélice, le fer imparfaitement doux du navire contracte, s'il garde longtemps la même orientation dans l'espace, une sorte de magnétisme sous-permanent, qui sera d'autant plus intense que les vibrations auront été plus nettes et que la même route aura été suivie plus longtemps. A bord des navires de grande vitesse un jour suffit pour que cette influence acquière une valeur assez voisine du maximum qu'elle n'atteindra d'ordinaire qu'au bout de trois ou quatre jours. D'ailleurs la durée nécessaire pour atteindre ce maximum comme aussi la valeur de ce dernier dépendent de bien des causes diverses qu'il faudra étudier dans chaque cas particulier, et dont les plus importantes sont les vibrations de la coque, la direction de la route suivie, la facilité plus ou moins grande du fer à contracter du magnétisme sous-permanent. L'échauffement plus ou moins considérable, plus ou moins symétrique de la coque par le soleil, le degré plus ou moins grand d'humidité de l'air paraissent avoir aussi une certaine influence. Malheureusement jusqu'ici les observations faites à bord n'ont pas été assez nombreuses pour qu'on puisse évaluer l'effet de chacune de ces influences diverses. Il est probable d'ailleurs qu'il faudrait, pour arriver à des conclusions exactes, faire les observations avec une précision que ne comportent ni le temps, ni les instruments dont on dispose à bord. Telles qu'elles sont aujourd'hui, on a pu cependant en tirer des conclusions importantes pour la pratique. Le capitaine Koldewey a rassemblé et discuté dans plus de 700 cas, pour chacun des deux coefficients les valeurs correspondantes obtenues l'une par l'observation, l'autre par le calcul et il a pu faire disparaître la plus grande partie de l'écart qui existait entre l'une et l'autre par la théorie suivante.

Admettons l'existence du fer qui, au point de vue magnétique, est dans un état intermédiaire entre celui du fer dur et celui du fer doux. Sous l'influence persistante d'une même route, c'est-à-dire d'une même orientation dans l'espace, et des chocs ou vibrations mécaniques survenus pendant cette route, ce fer va contracter un magnétisme sous-permanent dont l'action sur l'aiguille aimantée, analogue à celle du magnétisme permanent, pourra, comme celle-ci, se décomposer en deux composantes, l'une longitudinale que nous représenterons par $\frac{p}{\lambda}\frac{1}{H}$ l'autre transversale $\frac{q}{\lambda}\frac{1}{H}$.

Désignons, par v et v' les coefficients respectifs d'induction du fer intermédiaire décomposé en fer longitudinal et fer transversal, analogue aux tiges de fer doux a et e; par T la force *totale* terrestre : par ζp le cap magnétique du bâtiment compté de 0 à 360°, enfin observons les conventions faites sur le signe des forces magnétiques p. 54. Ceci posé, on aura :

$$p = -v\,\mathrm{T}\,\mathrm{Cos}\,\zeta_p \qquad q = +\,v'\,\mathrm{T}\sin\zeta_p.$$

L'expression des deux composants devient ainsi :

$$-\frac{v}{\lambda}\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{H}}\cos\zeta p \quad \text{et} \quad +\frac{v'}{\lambda}\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{H}}\sin\zeta p.$$

où H représente la valeur de la force horizontale au lieu où se trouve actuellement le bâtiment, et T la force terrestre totale qui a agi pendant que le navire était sur la route ζp; on peut donc prendre pour T la moyenne des valeurs qui prend l'expression $\frac{\mathrm{H}}{\cos\theta}$ quand le bâtiment parcourt cette route. En général, dans les latitudes moyennes on a une approximation suffisante en négligeant de faire cette moyenne et en se contentant de prendre $\frac{\mathrm{T}}{\mathrm{H}} = \frac{1}{\cos\theta}$. θ étant la valeur de l'inclinaison au lieu où l'on se trouve; ou encore $\frac{1}{\cos\theta_1}$, θ_1 étant la valeur moyenne de l'inclinaison pendant que le navire faisait la route ζp, quand cette inclinaison a changé notablement de valeur.

Les valeurs de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ deviennent ainsi :

$$\begin{aligned}\mathfrak{B} &= \frac{c}{\lambda}\operatorname{tang}\theta + \frac{P}{\lambda}\frac{1}{H} - \frac{v}{\lambda}\operatorname{séc}\theta\cos\zeta p \\ \mathfrak{C} &= \frac{f}{\lambda}\operatorname{tang}\theta + \frac{Q}{\lambda}\frac{1}{H} + \frac{v'}{\lambda}\operatorname{séc}\theta\sin\zeta p.\end{aligned} \tag{M}$$

Pour déterminer les rapports des six quantités P, Q, c, f, v et v' à λ, voici comment on opère.

Toutes les fois qu'on a fait une route ζp pendant plus de 24 heures, on fait les deux observations de variation qui donnent les deux valeurs observées de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. Chaque route ζp donne donc deux équations semblables. On réunit toutes les observations de cette nature et on a ainsi un nombre d'équations plus grand que les inconnues à déterminer. On les résout de la manière suivante, par la méthode des moindres carrés dont nous avons dit un mot p. 131, qui donne un nombre d'équations finales égal à celui des inconnues.

Soit à déterminer, par exemple, les trois quantités inconnues P, v et c qui figurent dans $\mathfrak{B}$. On multipliera chacune des équations en $\mathfrak{B}$ par le coefficient de l'une de ces inconnues dans cette équation, on additionnera toutes les équations ainsi préparées, et on aura ainsi l'équation finale relative à l'inconnue qu'on veut déterminer.

On agira ainsi, successivement, pour les trois inconnues et on obtiendra les trois équations finales dont on déduira les rapports des trois quantités inconnues à λ.

L'équation relative à $\frac{v}{\lambda}$ sera ainsi :

$$\begin{gathered}\mathfrak{B}\operatorname{séc}\theta\cos\zeta p + \mathfrak{B}_1\operatorname{séc}\theta_1\cos\zeta p' + \ldots. = \\ + \frac{c}{\lambda}\operatorname{tang}\theta\operatorname{séc}\theta\cos\zeta p + \frac{c}{\lambda}\operatorname{tang}\theta_1\operatorname{séc}\theta_1\cos\zeta p_1 + \ldots \\ + \frac{P}{\lambda}\frac{1}{H}\operatorname{séc}\theta\cos\zeta p + \frac{P}{\lambda}\frac{1}{H}\operatorname{séc}\theta_1\cos\zeta p_1 + \ldots. \\ - \frac{v}{\lambda}\operatorname{séc}^2\theta\cos^2\zeta p - \frac{v}{\lambda}\operatorname{séc}^2\theta_1\cos^2\zeta p_1 - \ldots\end{gathered}$$

On formera pareillement les cinq autres équations finales qui jointes à celle-ci, donneront les valeurs des six rapports cherchés.

Ayant les six rapports inconnus, on calcule alors par les équations les valeurs de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ qui correspondent à une route donnée ζp, et on compare la différence qui existe entre la valeur calculée ainsi et celle que l'on avait obtenue par l'observation.

Voici le résultat de cette comparaison dans plus de 700 cas pour chacun des deux coefficients :

Dans 65 p. 100 des cas la différence a été comprise entre 0 et 1°.

Dans 17 p. 100 des cas la différence a été comprise entre 1° et 1°5.

Dans 11 p. 100 des cas la différence a été comprise entre 1° 5 et 2°.

Dans 5 p. 100 des cas la différence a été comprise entre 2° et 2°5.

Dans 1 p. 100 des cas la différence a été comprise entre 2°5 et 3°.

Dans 1 p. 100 des cas la différence a été comprise entre 3° et plus.

Dans la majorité des cas la différence est donc moindre que 1 degré et il n'y a pas lieu de s'étonner de la valeur de cet écart, quand on songe au peu de précision que peuvent avoir les observations à bord, à toutes les erreurs qui entachent les déterminations de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ obtenues par des observations faites dans un même quadrant, enfin à l'imperfection regrettable des cartes magnétiques actuelles auxquelles il faut emprunter les éléments du magnétisme terrestre nécessaires au calcul. Nous admettons donc que pour avoir des expressions exactes de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, autrement dit pour pouvoir calculer à priori, à un degré près, dans un navire en fer, la valeur de la déviation dans un lieu et à un cap donnés, il faut introduire et calculer dans chacun des deux coefficients un troisième terme que nous appellerons « coefficient de route ».

Les valeurs des deux termes $\frac{v}{\lambda}$ et $\frac{v'}{\lambda}$ sont comprises toutes deux, pour les cas examinés jusqu'à présent, entre $+ 0{,}02$ et $+ 0{,}03$.

Importance pratique des termes correctifs. — L'auteur la fait ressortir de la façon suivante. Imaginons un paquebot transatlantique faisant les voyages du Hâvre à New-York et vice versâ. Pendant le voyage d'aller de France en Amérique, et sur les routes Ouest, on a déterminé par l'observation la valeur de $\mathfrak{C}$. Mais dans le voyage de retour il faudra se garder de prendre encore cette même valeur. En effet la différence des valeurs de $\mathfrak{C}$ déterminées cap à l'Est et cap à l'Ouest est égale d'après les équations M à $2\,\frac{v'}{\lambda}\,\text{séc}\,\theta$, ce qui donne à l'entrée de la Manche $2 \times 0{,}025 \times 2.6 = 0{,}120$ ou en degrés $0{,}120 \times 57°3$ soit 6° 8. Donc, si on avait trouvé $C = -3°5$ au voyage d'aller, on trouvera au voyage de retour $C = +3°3$.

Si donc on ne pouvait faire d'observation de variation à cause de la brume et qu'on n'ait pas pris la précaution d'obtenir, pour le bâtiment et pour le compas, la valeur de $\frac{v'}{\lambda}$ on aurait commis une erreur du route qui, en vingt-quatre heures, en supposant une vitesse de 12 nœuds, aurait mis le navire 18 milles trop au Nord.

Un capitaine soucieux d'éviter les erreurs de route, en temps de brume, doit donc saisir toutes les occasions de déterminer, pour son compas étalon, la valeur des deux coefficients de route.

Déviations anormales provenant de la route antérieure. — Le travail précédent rend parfaitement compte des déviations anormales du compas dues à l'influence de la route antérieure à celle que l'on fait quand elle a été suivie pendant plusieurs jours. Il donne le moyen de calculer les deux coefficients de route $\frac{v}{\lambda}$ et $\frac{v'}{\lambda}$ qui représentent cette influence. Les valeurs ainsi obtenues sont d'autant plus exactes que le nombre des observations est plus considérable et les observations elles-mêmes mieux faites. On peut d'ailleurs se procurer rapidement une valeur approchée de ces deux coefficients aussitôt le départ du port dès qu'on a tenu un cap magnétique quelconque (ou un cap distant de l'un de ceux-là de 15° au plus) pendant quelques jours.

Pour cela, il faut avoir soit un compas compensé muni de la barre de Flinders, soit plus généralement avoir pu déjà calculer les deux parties respectives des coefficients B et C comme nous avons appris à le faire page 69.

On opère ainsi :

Quand le bâtiment a suivi pendant plusieurs jours un cap magnétique déterminé, avant de mettre à une autre route, on commencera par prendre le cap cardinal magnétique perpendiculaire à celui que l'on a fait, et en même temps le plus voisin de la route que l'on doit faire.

Par exemple, si le bâtiment a fait de l'Est plusieurs jours et qu'on veuille faire ensuite du N 30 O, on commencera par mettre le cap au Nord du compas, et quatre à cinq minutes après on observe la variation ou la lecture d'écart normal, ou mieux les deux à la fois. Nous dirons dans la cinquième partie comment on peut se servir de la lecture d'écart normal.

Supposons qu'on ait observé la variation. On passe à la déviation, puis on forme la quantité Déviation normale — Déviation observée.

Nous entendons par déviation normale, celle que le compas compensé, muni de Flinders, avait au départ ou la déviation, calculée pour le cap Nord et le lieu donné, au moyen des valeurs de A, E et de la valeur de C calculée pour le lieu donné.

Cette différence doit être égale à $\frac{v'}{\lambda}$ séc Θ.

Connaissant Θ, on tire une valeur approchée de $\frac{v'}{\lambda}$. qui permet d'attendre de nouvelles observations.

$\frac{v}{\lambda}$ se déterminerait de la même façon.

L'angle ζp doit s'entendre de la route même que l'on fait quand elle a été tenue un temps suffisamment long que l'expérience déterminera. Mais les formules précédentes ne s'appliquent pas aux faits observés à bord du transport de l'État *le Tonquin* (aux routes Est et Ouest), par MM. les lieutenants de vaisseau Gaschard et Maureau et qu'ils ont bien voulu me communiquer. Seule l'observation de la variation ou de la lecture de l'écart normal, ou même des deux à la fois, permet de découvrir la valeur de ces déviations anormales, puis d'en tenir compte dans des cas analogues quand on ne peut pas prendre de relèvements. La valeur considérable des déviations anormales à bord du *Tonquin* doit tenir à une trop grande proximité du compas avec les masses ou cloisons de fer voisines.

Déviations anormales dépendant d'une même route suivie plusieurs jours.

Observations de MM. Gaschard et Maureau. — Le compas du *Tonquin* était un compas Thomson parfaitement compensé, muni de Flinders, n'ayant, quand le bâtiment était en rade, au repos, que des déviations insignifiantes oscillant entre — 1° et + 1°.

Le compas, situé sur la passerelle supérieure, était à 35 mètres de l'étrave et à 70 mètres de l'arrière. A $7^m,50$ (en projection) des deux murailles, ses coefficients étaient :

A, E et f négligeables.

D corrigé par les sphères était de + 4° 3.

Enfin, on avait :

$$\frac{P}{\lambda} = 12^\circ \quad \frac{Q}{\lambda} = -8^\circ 8 \quad \frac{c}{\lambda} = -10^\circ 2.$$

Malheureusement, la valeur exacte de λ manque, ce qui est très regrettable, car il ne faut pas oublier que les déviations anormales sont toujours d'autant plus considérables que λ est plus faible. Une observation d'oscillation a donné la valeur approchée 0,830, qui explique en partie la grandeur des déviations anormales.

L'effet des composantes $\frac{P}{\lambda}$ et $\frac{Q}{\lambda}$ peut être représenté par un seul pôle bleu B, placé sur une droite dont l'angle avec la quille du navire (vers l'avant) serait de 36° environ et dont l'intensité serait égale à 0,25 de la force λ.

Dans ces conditions, voici le résumé des faits observés les plus saillants :

1° Dans la traversée d'Aden à Colombo (du 3 au 13 mai 1884) route moyenne S 80 E. δ initial $= 0$.

δ à l'arrivée $+ 2° 30'$.

Relâché deux jours à Colombo.

Traversée de Colombo à Achem (15 mai au 18 mai), route moyenne N 34 E, δ au départ $+ 2° 30'$. à l'arrivée $+ 4° 30'$.

Dans les traversées inverses, avec des routes Ouest, on observe des faits analogues. La déviation anormale atteint $- 4° 30'$; elle est acquise en dix à douze jours.

Les déviations anormales, provenant des effets d'induction aux routes Est ou Ouest disparaissent d'ordinaire entièrement après trois ou quatre jours de route, à des caps divers, éloignés de ces deux routes.

2° Dans une traversée de retour d'Achem à Aden, le compas acquit comme d'ordinaire une déviation de — 4° NO. Mais quatre jours après le départ d'Aden, dont trois passés dans la mer Rouge à des routes voisines du Nord, la déviation anormale se maintenait avec une persistance inattendue et atteignait encore — 2° 30' NO.

Une série d'observations prises entre l'ESE et le SO, en passant par le Nord, indiqua nettement une déviation semi-circulaire dont le maximum 3° correspondait sensiblement aux caps N 54 O (3° NO) et S 54 E (3° NE).

Ces caps sont précisément ceux pour lesquels le pôle B du navire agit perpendiculairement à l'aiguille aimantée.

3° Aux routes comprises entre le N 35 et le N 45 E, et aussi entre le S 35 et le S 45 O, à ces *dernières surtout,* soit en allant des Pescadores à Saïgon, soit en partant de Tête d'Achem pour Bourbon, on a observé dans les deux cas, sans changement de cap, une déviation N E croissant plus rapidement encore avec le temps et atteignant cette fois en quatre jours le maximum de 4° qu'elle n'acquérait qu'en dix ou douze jours sur les routes Est ou Ouest précitées.

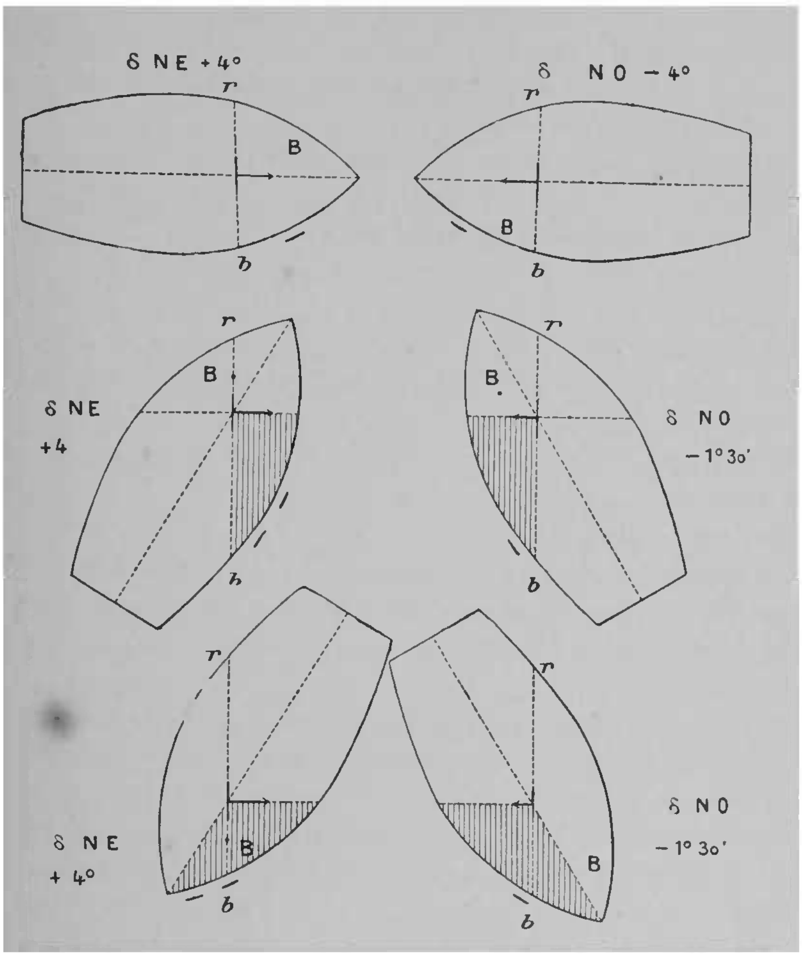


Fig. 28 *bis*.

(Voyez sommaire du livre, p. XII, pour les déviations anormales.)

MM. Gaschard et Maureau imaginèrent pour expliquer ces faits un certain nombre d'hypothèses dont aucune ne leur parut satisfaisante. Ils semblent pencher vers celle qui admettait une augmentation d'intensité dans le pôle B du navire qui deviendrait ainsi une sorte de pôle périodique. Il me paraît difficile d'admettre que la variation d'intensité, si toutefois elle a lieu, se produira toujours dans le même sens; son signe doit dépendre de l'orientation de l'aimant par rapport à l'aimant terrestre. Mais quelle que soit l'explication qu'on en donne, ces observations ont par elle-même un intérêt considérable. Faites avec grand soin, elles montrent que, tout au moins, dans certains cas particuliers, une route suivie pendant plusieurs jours peut donner lieu à des déviations anormales très sensibles : Et cela seul suffit pour voir combien il est nécessaire d'observer les prescriptions relatives à l'emplacement du compas et à la détermination de λ puisque toutes choses égales d'ailleurs les variations sont inversement proportionnelles à cette quantité.

On explique ce me semble toutes les observations faites, sauf une seule, d'une façon plausible sans faire intervenir le changement d'intensité du pôle B. Il suffit pour cela d'examiner les croquis ci-dessus (fig. 28 *bis*) qui représentent la coupe du navire par le plan horizontal de la rose et où on a indiqué par une flèche la direction de la composante de la force perturbatrice, perpendiculaire à l'aiguille aimantée, produite par le magnétisme permanent développé par l'influence de la terre et les vibrations de la coque orientée d'une manière constante.

On a tenu compte de l'emplacement du compas, et de la polarité développée dans les parties du bâtiment les plus voisines de la rose. Enfin et d'une façon générale, il ne faut pas oublier que dans les conditions où nous nous trouvons la tranche du bâtiment comprise entre deux plans verticaux, parallèles à ligne N-S magnétique, et distants l'un et l'autre de quatre à cinq mètres de l'axe du compas, tend à devenir un aimant temporaire dont la déviation sera plus ou moins rapprochée ou en coïncidence même avec la ligne N-S magnétique, suivant la disposition des masses de fer qu'elle contient, mais qui dans tous les cas diminue de plus en plus la force directrice de l'aiguille et par suite augmente de plus en plus la valeur absolue de la déviation, et cela jusqu'à ce que cet aimant temporaire ait atteint son maximum d'intensité.

Le signe de la déviation anormale peut être prévu par ces simples considérations et en tenant compte de la polarité développée dans le fer transversal par toute autre route que celles Est ou Ouest.

Quant à sa grandeur, il semble que l'observation directe puisse seule la déterminer.

L'intensité magnétique des pôles temporaires développés par la route est proportionnelle à la force totale terrestre. La force directrice de l'aiguille étant proportionnelle à la force horizontale, la déviation produite sera proportionnelle à séc Θ. Ceci explique dans une certaine mesure pourquoi le maximum de la déviation anormale atteint sur les routes Est et Ouest où l'inclinaison était très voisine de zéro, n'ait été atteint que dans dix ou douze jours tandis que ce même maximum est observé en quatre jours aux routes N 30 E et S 30 O, sur lesquelles la valeur de l'inclinaison varie d'une façon beaucoup plus sensible.

Au cap S 30 O particulièrement, il est évident que la plus grande proximité du compas et des parties du navire ayant le maximum d'intensité magnétique de polarité bleue explique la plus grande rapidité avec laquelle le maximum est atteint.

Un seul fait reste inexpliqué, c'est pourquoi on a trouvé une déviation semi-circulaire des signes indiqués quand le bâtiment a fait un tour presque entier d'horizon après une route Ouest gardée une douzaine de jours, suivie de routes voisines du Nord faites pendant trois jours. Étant donné l'orientation particulière de l'aimant permanent du bâtiment, pendant ces dernières routes, il faudrait admettre que le magnétisme temporaire développé pendant la route a eu une intensité suffisante pour réagir par influence sur le pôle B et lui communiquer une plus grande intensité, masquée pendant la route par la plus grande intensité contraire de l'aimant temporaire.

Mais au moment où l'on fait exécuter au navire un tour d'horizon, le magnétisme temporaire du navire disparaît très vite, tandis que le magnétisme semi-permanent de B disparaît beaucoup plus lentement. On aurait donc de ce fait, pendant quelque temps, une déviation semi-circulaire dont les caractères répondraient bien aux observations faites. La masse de fer d'un bâtiment tel que le *Tonquin* est si considérable que les effets observés sont nécessairement très complexes. Des expériences de laboratoire pourraient cependant indiquer si et dans quel sens peut varier l'intensité assez faible d'un pôle d'aimant semi-permanent quand on imprime à cet aimant des trépidations prolongées alors qu'il est orienté dans le méridien magnétique suivant l'aiguille d'inclinaison et dans un sens ou dans l'autre.

Quoi qu'il en soit ces observations indiquent avec quel soin il faut surveiller le compas si on veut être en mesure d'évaluer, en temps de brume, la grandeur des déviations anormales. Il faudra tenir compte de la route, des éléments magnétiques terrestres correspondants à cette route, de l'allure de la machine. Des observations faites avec soin sur des paquebots en fer recevant l'action du soleil, alternativement d'un bord et de l'autre, pendant leurs traversées d'aller et de retour sous les tropiques pourraient mettre en relief l'action de la température sur ces déviations anormales.

Le mieux serait de les réduire à n'avoir que de faibles valeurs, ne dépassant pas 1°, en choisissant convenablement la place des compas.

DES COEFFICIENTS.

De $\lambda = 1 + \frac{a+e}{2}$. Nous avons parlé avec détail de ce coefficient dans la première et la troisième parties et, en insistant sur son importance, nous en avons donné les valeurs qu'on trouve d'ordinaire pour ce paramètre.

De $\mathfrak{D} = \frac{a-e}{2\lambda}$. Pour les compas de relèvements des navires de guerre, ce coefficient est compris, en général, entre $+0,05$ et $+0,14$. Ce qui donne pour D dont il est à très peu près le sinus des valeurs comprises entre $+3°$ et $+8°$. Dans des cas exceptionnels, il atteint des valeurs positives considérables 10, 12 et 14° : exceptionnellement encore, il a des valeurs négatives, à bord des navires de guerre où se trouvent, par le travers du compas, de grandes masses de fer, pièces d'artillerie, canots ou embarcations en fer ou en acier. L'examen des pièces de fer qui se trouvent autour du compas permet de prévoir approximativement la valeur de ce coefficient.

De a et de e. Quand on a λ et D, on peut calculer a et e par les formules de la page 160, qu'on peut encore écrire :

$$a = \lambda(1 + \mathfrak{D}) - 1 \qquad\qquad e = \lambda(1 - \mathfrak{D}) - 1$$

Pour les compas étalons ou de relèvements des navires de guerre, les valeurs de ces deux paramètres sont en général négatives, et comprises pour a de 0 à $-0,20$, pour e de 0 à $-0,42$.

Ils ont pourtant parfois des valeurs positives comprises pour a entre 0 et $+0,05$ et pour e entre 0 et $+0,16$.

Toutes choses égales d'ailleurs, ces coefficients ont, en général, les plus fortes de ces valeurs pour les compas de route placés ordinairement plus près des pièces de fer horizontales que les compas de relèvements.

De $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$. On les calcule au moyen des valeurs de A et E dont ils sont les sinus (V. p. 163). Ces dernières valeurs sont longues et délicates à déterminer, parce qu'elles sont comparables aux grandeurs des erreurs d'observation que l'on peut commettre à bord, 20 à 30 minutes. Une fois ces deux coefficients calculés, on peut en déduire les paramètres b et d du fer doux qui proviennent du fer doux dissymétrique tant transversal que longitudinal (V. pl. I, p. 56). On a ainsi : $b = \lambda\,(\mathfrak{E} - \mathfrak{A})$; $d = \lambda\,(\mathfrak{E} + \mathfrak{A})$.

De — J (p. 186) aux diverses expressions. En se reportant à l'expression de J donnée page 186, on voit qu'il provient de e, $+ k$, et $+$ R. En général, dans l'hémisphère Nord $e + k$ est positif, par conséquent on diminuera ce coefficient, et par suite l'erreur de bande en plaçant le compas au-dessus du pôle rouge de l'aimant permanent du navire, c'est-à-dire sur l'avant du navire pour des bâtiments construits cap au Nord, dans l'hémisphère Nord.

— J est presque toujours positif. Pour les compas de relèvements bien placés, sa valeur est comprise entre 0 et 1, ou très peu supérieure à 1. Mais pour les compas de route, cette valeur peut aller jusqu'à $+ 2{,}2$.

Dans ce dernier cas, avec une bande très modérée de 8 à 10°, s'ajoutant à l'influence d'une route longtemps suivie, on voit que l'on pourrait commettre une erreur de près de deux quarts sur la route, dans ces cas exceptionnels, si on négligeait de tenir compte de ces influences.

— J n'a que très exceptionnellement des valeurs négatives; elles sont en général fort petites et atteignent rarement 0,5 en valeur absolue.

Quelquefois on trouve ce coefficient exprimé en degrés et minutes; c'est alors qu'on a multiplié simplement par 1° la valeur donnée par la formule 58 (p. 187).

De g. En général positif, rarement négatif.

Pour les compas de relèvements, sa valeur est comprise entre 0 et 0,2, et fréquemment aux environs de 0,1. Ses valeurs négatives sont inférieures à 0,05.

Pour les compas de route, les valeurs positives vont jusqu'à $+ 0{,}4$ exceptionnellement, et les valeurs négatives jusqu'à 0,37.

De μ. Son expression donnée page 86 montre que ce coefficient varie avec le lieu occupé par le navire sur le globe, puisque cela entraîne une variation de Z. Nous n'avons pas donné une carte des valeurs de Z; on obtient dans chaque lieu la valeur de cette composante par le produit très simple H tang θ.

Dans la très grande majorité des cas, μ s'obtient (p. 187 et 188) en faisant une seule observation de rapport de force verticale aux caps Est et Ouest magnétiques.

Pour pouvoir séparer, dans μ, ce qui provient du fer doux de ce qui provient du fer dur, il faut absolument observer en deux lieux où la composante verticale a une valeur très différente.

Si on appelle Z, Z′ et μ, les forces verticales à terre et à bord, ainsi que la valeur du coefficient μ dans le premier lieu, Z_1, Z′ et μ_1 les mêmes quantités dans le second lieu on aura :

$$k = \frac{Z(\mu - 1) - Z_1(\mu - 1)}{Z - Z_1} \text{ et } R = \frac{Z Z_1(\mu_1 - \mu)}{Z - Z_1}$$

Il serait bon de faire ces calculs, afin de pouvoir faire de l'erreur de bande une compensation valable pour tous les lieux du globe, en employant à la fois pour cela la barre de Flinders et un aimant vertical ; quand on emploie seulement l'aimant vertical, il faut avoir soin de le déplacer convenablement de temps à autre, ce qui est gênant.

Les circonstances les plus favorables sont d'opérer dans les deux hémisphères et d'avoir pour Z et Z_1 les plus grandes valeurs possibles. En effet, le signe de tang θ changeant d'un hémisphère à l'autre, les deux termes du dénominateur s'ajoutent, ce qui augmente la précision des valeurs obtenues. Nous dirons dans la quatrième partie, à propos de la barre de Flinders comment on se sert des valeurs de k et de R pour faire la compensation de l'erreur due à la bande.

La valeur numérique du coefficient μ est comprise d'ordinaire entre 0,8 et 1,2, elle va parfois à 1,3 pour les compas de route.

De la place du compas. — Un compas est d'autant mieux placé que :

1° Les déviations y sont plus faibles en valeur absolue ; et par suite, les variations de la force directrice plus faibles ;

2° La valeur de λ plus grande ;

3° Les coefficients de l'erreur due à la bande plus faibles.

On satisfait à ces conditions, d'une manière générale, en éloignant le plus possible de toutes les pièces de fer un peu considérables, en particulier, des pièces de fer verticales capables de donner une valeur considérable aux paramètres c et k, c'est-à-dire de faire varier considérablement les coefficients $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$ et J quand le navire change de lieu, et aussi des pièces de fer horizontales susceptibles de donner, à a et e, des valeurs augmentant la déviation quadrantale et diminuant la force directrice, et à g des valeurs introduisant un terme correctif de plus dans l'erreur due à la bande.

Il faudra donc examiner avec soin toutes les pièces de fer avoisinant le compas aussi bien sur le pont, qu'au-dessus et au-dessous, et voir si elles peuvent introduire les paramètres indiqués précédemment dans une mesure notable. Dans ce cas, on tâcherait de trouver pour le compas un autre emplacement plus convenable.

Résumé des observations nécessaires. — Pour les bâtiments neufs, deux cas à distinguer, suivant que l'on trouve ou non dans les documents publiés par les divers services hydrographiques les valeurs des différents coefficients pour des navires construits au même cap, d'une manière identique et pour des compas placés identiquement comme ceux que l'on veut examiner.

Premier cas. On a une valeur estimée et approximative des coefficients λ, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$.

Alors au bassin et dans le port, il suffit de faire à un seul cap une observation de variation et une de force horizontale pour calculer les coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ et obtenir le dygogramme qui donne à la fois les déviations approchées et les valeurs de la force directrice. On pourra faire ces observations pour différentes places, différentes hauteurs du compas, tandis que l'on sera encore au bassin, et choisir ainsi le meilleur emplacement.

Deuxième cas. On n'a aucun renseignement sur les différents coefficients.

Dans ce cas, pour les compas de relèvements bien placés dans l'axe du bâtiment, on prendra $\lambda = 0{,}900$. On observera aux trois caps principaux d'un quadrant la variation et on en déduira les valeurs de B, C, D, d'où les valeurs de $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$. Avec ces dernières, on tracera le dygogramme approché et on aura ainsi des renseignements très utiles sur le plus ou moins de convenance de la place choisie pour le compas, au point de vue des déviations quand le navire est droit.

Pour savoir si le coefficient de l'erreur due à la bande a une valeur admissible, il suffira dans le premier cas de prendre sa valeur dans le tableau indiqué, et si on ne l'y trouve pas, de faire, comme pour le second cap, une observation de rapport de force verticale quand le cap du bâtiment est à l'Est ou à l'Ouest magnétiques, ou même à 10° près de ces deux caps.

On aura ainsi tous les éléments d'un examen sérieux du compas, Pour les bâtiments ayant déjà navigué, on devra trouver, dans les pièces jointes aux devis d'armement, le cap de construction et les valeurs des différents coefficients et de λ pour les différents compas du bord. Par suite, il suffira de faire à un seul cap les observations de déviation et de force horizontale, pour avoir la valeur des deux coefficients variables, et construire le dygogramme qui donne à la fois la courbe des déviations et celle des forces directrices.

Si on veut compenser le compas, on pourra même effectuer très approximativement les opérations de compensation horizontale à ce seul cap, et n'avoir plus qu'à les rectifier légèrement en rade. Au cas où ce cap serait très voisin de l'Est ou de l'Ouest magnétique (10° au plus), on pourrait même effectuer encore la compensation très approximative de l'erreur due à la bande, ce qui est important comme nous le verrons plus loin.

Tracé du dygogramme donnant δ et la force directrice. — Au port de départ les observations de déviation donnent A, B, C, D, E, d'où l'on tire les valeurs de $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$. Les observations de force horizontale aux huit caps principaux donnent λ, ou OP l'unité de longueur de la figure. Ceci posé, on trace le dygogramme à la plus grande échelle possible : en prenant, pour représenter λ, une longueur de 20 centimètres on aura toute l'approximation désirable. En traçant un cercle du point O, comme centre, avec un rayon de 13 centimètres environ, le degré occupera sur la circonférence une longueur de 2 millimètres environ, bien suffisante pour permettre d'apprécier δ au demi-degré près. Le mieux est de prendre, pour tracer ce cercle, le contour du rapporteur que l'on possède, ce qui permet de le diviser immédiatement de part et d'autre de OP, 20 à 25 degrés de chaque côté suffisent.

On peut préparer un grand nombre de dygogrammes semblables où l'on ait tracé à l'avance les lignes OP et le cercle de rayon AD. Ceci posé en un lieu donné, deux observations de variation donneront B et C, d'où l'on tirera $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, ce qui déterminera pour le lieu donné la ligne DN et par suite le pôle Q du dygogramme, correspondant à ce lieu donné. Ceci posé, on peut tracer le dygogramme en quelques minutes, et on a pour un cap quelconque la déviation et la force directrice H' à ce cap, à bord, mesurée avec la force λH prise pour unité.

Si on veut le nombre qui représente la même force quand on prend pour unité celle choisie par la carte, il est clair qu'il faut multiplier le nombre précédent par la valeur constante de λ

et par la valeur numérique de H qui correspond au lieu donné.

Exemple : λ étant égal à 0,8 et étant représenté par $OP = 20$ centimètres dans le dygogramme ; on trace le dygogramme dans un lieu où $H_1 = 0,7$. A un cap donné on mesure la ligne du dygogramme qui représente H' on trouve 18 centimètres. Donc H' mesuré avec λH_1 comme unité c'est-à-dire $\frac{H'}{\lambda H_1} = 0,9$.

Le nombre qui représente la force directrice, au cap donné, H', quand on la mesure en prenant pour unité de force celle de la carte, est donc $0,9 \times \lambda \times H_1 = 0,9 \times 0,8 \times 0,7 = 0,504$. C'est-à-dire que le compas aura de grandes chances d'être paresseux à ce cap. En faisant un calcul semblable, dans chaque cas particulier, on pourra comparer la force directrice du compas à bord, en un lieu et à un cap quelconque, à la force prise pour unité dans la carte, et savoir de suite, par la valeur numérique obtenue, le degré de sensibilité qu'on peut attendre du compas.

FIN DE LA TROISIÈME PARTIE

QUATRIÈME PARTIE

COMPENSATION DES COMPAS

CHAPITRE PREMIER

NÉCESSITÉ DE LA COMPENSATION

Quand les déviations du compas atteignent de grandes valeurs absolues, 15 degrés et plus par exemple, cela indique que les forces perturbatrices, exercées sur le compas par les fers de toute nature du navire, sont puissantes et qu'elles impriment à la force directrice de l'aiguille des variations considérables dans son intensité et sa direction. Ces variations de force directrice sont nuisibles au bon emploi du compas pour plusieurs raisons.

D'abord, comme nous l'avons vu dans la première partie (ch. VI), elles font varier la durée des oscillations du compas à différents caps; puis, si elles atteignent une valeur suffisante pour qu'à certains caps la force directrice soit trop faible pour vaincre l'adhérence entre le pivot et la chape de la rose, il en résultera, qu'à ce cap, la rose fera pour ainsi dire corps avec le navire, et tournera avec lui sans indiquer de changement du cap, tant que le moment de la force directrice ne sera pas assez grand pour vaincre cette adhérence. On conçoit les dangers sérieux qui naissent d'une telle paresse du compas. Les exemples en sont fréquents à bord des bâtiments en fer, et bien souvent l'officier chargé de la route est obligé de remédier à cette paresse du compas en imprimant fréquemment, lors des changements de cap, de petites secousses à la boîte qui renferme la rose. Mais ce remède nécessaire a l'inconvénient de provoquer parfois des usures rapides de la chape et du pivot, et d'augmenter la grandeur du frottement qui s'exerce entre eux : il vaut donc mieux ne pas avoir à l'employer.

Enfin, des déviations considérables empêchent qu'on ne puisse passer facilement, du changement de cap indiqué par la rose, à l'angle réellement décrit par le bâtiment autour de la verticale. Il faut un calcul pour cela, et tout calcul implique des chances d'erreur; de plus, le changement de direction de la force directrice en passant de la position initiale à la position finale donne à la rose des oscillations dont l'amplitude est égale à la différence des déviations à ces deux caps et qui rendent longue et délicate la misc en route au nouveau cap.

Cet inconvénient, sensible à bord d'un bâtiment qui navigue isolément, peut devenir dangereux pour les bâtiments qui navignent en escadre à des distances rapprochées, et qui doivent manœuvrer simultanément pour changer l'ordre de formation.

La recherche d'un compas sans déviation s'est donc imposée aussitôt que les bâtiments à vapeur, leur construction ou leur protection en fer, sont devenus d'un usage général.

Ici plusieurs systèmes sont en présence.

Faut-il chercher la solution du problème dans la suppression des causes mêmes qui font naître les déviations, ou bien dans une sorte de désaimantation du navire, ou enfin, dans l'introduction, à bord, de forces perturbatrices nouvelles, capables de contre-balancer exactement les effets des forces perturbatrices déjà existantes?

La première solution ne saurait être demandée qu'à des sortes d'écrans magnétiques, à des substances qui, interposées entre le compas et les masses de fer perturbatrices, empêcheraient l'action de ces dernières de se propager jusqu'à l'aiguille. De pareilles substances ne sont pas connues, et, s'il en existait, on ne saurait les employer, puisqu'elles s'opposeraient également à la propagation de l'action magnétique du globe, et qu'alors l'aiguille du compas, n'étant soumise à aucune force, serait en équilibre dans une position quelconque. Le compas serait indifférent et ne pourrait servir à diriger le bâtiment.

La seconde solution, celle de désaimanter le navire, qu'on a déjà tenté d'employer, ne semble pas, dans l'état actuel de nos connaissances, pouvoir être employée avec succès. Si l'on s'adresse, en effet, à de puissants courants électriques pour détruire le magnétisme sous-permanent, d'abord il est difficile, sinon impossible, d'atteindre exactement la limite où ce magnétisme sous-permanent est entièrement détruit; et, en admettant même qu'on puisse savoir le moment précis où ce résultat a été obtenu, on ne peut savoir dans quel état magnétique précis on laisse le navire et si, après cette opération et un temps plus ou moins long, il ne reprendra pas un état magnétique fort différent du premier et plus dangereux encore, puisqu'on n'aura sur lui aucune espèce de notion.

Enfin, en admettant, ce qui n'est pas, que l'influence du magnétisme sous-permanent sur le compas soit annulée, celle du fer doux subsisterait, et nous avons vu que, parmi les coefficients qui la représentent, le plus important, D, atteint fréquemment 7 à 8 degrés, parfois 10 degrés, et atteint même 14 degrés dans des cas particuliers.

La troisième solution reste donc seule. Il s'agit d'introduire, à bord, de nouvelles forces perturbatrices, soumises aux mêmes lois, mais égales et contraires à celles que le fer du navire met déjà en jeu; telles en un mot, qu'imprimant à l'aiguille aimantée, à chaque cap du bâtiment, une déviation précisément égale et de signe contraire à celle que produisent les forces du navire, la déviation totale soit nulle. Cette conclusion forcée fut pourtant longtemps combattue, malgré les enseignements répétés de l'expérience, malgré les efforts des savants anglais principalement, en tête desquels il faut placer le célèbre astronome royal sir Airy qui, en 1866, résumait magistralement la question dans le parallèle suivant :

COMPAS NON CORRIGÉ	COMPAS CORRIGÉ
Emploi d'une table d'erreurs	**Emploi d'habitacles permettant le déplacement aisé des correcteurs**
I. La force directrice de l'aiguille est extrêmement différente pour des caps différents.	I. La force directrice de l'aiguille est sensiblement constante.
II. La partie principale des erreurs mises en table provient du magnétisme sous-permanent, dont l'effet sur la déviation varie considérablement dans les différentes parties du globe.	II. Les aimants, qui corrigent rigoureusement l'effet du magnétisme sous-permanent dans un lieu donné, sont capables de le corriger rigoureusement en tout autre endroit.
III. Il est donc absolument nécessaire de faire de temps à autre une nouvelle table d'erreurs, au moyen d'observations faites à un certain nombre de caps, nombre qui ne peut être moindre que huit, si les déviations sont comprises de 20 à 30 degrés.	III. De nouvelles observations ne sont nécessaires que quand il y a des raisons de penser que le magnétisme du navire a changé, et alors deux observations seulement suffisent.
IV. Enfin, dans des parages de navigation difficile, dans le chenal des fleuves, par exemple, et, en général, quand il faut changer fréquemment de route, l'emploi d'une table d'erreurs entraîne avec lui de grands dangers.	IV. Dans quelque circonstance de navigation que ce soit, le compas compensé donne des indications exactes, quelle que soit la route suivie par le bâtiment, et son emploi est parfaitement simple.

Malgré ce contraste saisissant, on trouve encore des marins qui pensent, disent, ou écrivent, que la compensation est dangereuse, qu'elle rend le compas paresseux ou qu'elle *alourdit la rose.* Expression presque incompréhensible, surtout quand on la trouve employée par ceux qui ont étudié les formules d'Archibald Smith, et qui professent pour elles l'admiration qu'elles méritent; car tout ce que nous allons dire montrera que ces formules, qui, à l'époque où elles étaient publiées, ne visaient point la compensation, rendent pourtant bien compte des avantages de cette méthode.

La nécessité de la compensation admise, le principe de la méthode que nous venons d'énoncer plus haut montre que nous devrons introduire à bord : 1° des aimants permanents, pour contre-balancer l'effet du magnétisme sous-permanent; 2° des pièces de fer doux, pour contre-balancer l'effet de celles du navire.

Pour savoir comment les placer, il convient de se reporter à l'analyse élémentaire, faite dans la première partie (ch. I et II), des effets, sur le compas, des aimants P, Q, R, qui représentent le magnétime sous-permanent du navire, et des neuf tiges de fer doux qui représentent le magnétisme induit. Ces effets une fois compris, la question n'offre aucune difficulté.

Afin de simplifier l'exposition, tout en la rendant plus précise, reprenons la formule à cinq termes de la déviation; elle convient toujours dans le cas que nous examinons, puisqu'en disposant autour du compas des aimants et du fer doux d'une manière même grossièrement approchée, on peut et il faut toujours amener la déviation à être inférieure à 20 degrés en valeur absolue.

CHAPITRE II

PRINCIPES DE LA MÉTHODE DE LA COMPENSATION

Le compas sera compensé et la déviation à tous les caps sera nulle si, en introduisant à bord, près du compas, du fer doux et des aimants compensateurs, on arrive à annuler les cinq coefficients que contient la formule précédente.

Correction du terme en A. — A provient, nous l'avons vu, du fer doux dissymétrique représenté par les tiges *d* et *b* (planche I), et aussi des erreurs d'observations de toute nature, qui sont constantes. Quand ce coefficient est inférieur à 2 degrés, on ne fait rien pour en modifier la valeur, on se contente d'en tenir compte par le calcul; mais, quand il atteint ou dépasse cette valeur, il serait préférable de s'en débarrasser une fois pour toutes en déplaçant la ligne de foi du compas et en la mettant, d'un nombre de degrés égal à A, à babord si A est négatif, à tribord s'il est positif. Ce déplacement corrige A seulement pour les indications de route ; mais pour les relèvements, il faudrait déplacer le zéro même de la rose par rapport à l'axe des aiguilles aimantées.

Correction du coefficient B. — Le sinus de l'arc représenté par ce coefficient a pour valeur approchée (v. fin du ch. III. 1re partie) :

$$\frac{1}{\lambda H}(cZ + P),$$

par suite, pour l'annuler, il faut placer près du compas :

1° Un ou plusieurs aimants, tels qu'ils contre-balancent exactement l'action de l'aimant longitudinal P ;

Ces aimants devront donc être parallèles à la quille ;

2° Une tige de fer doux verticale, placée dans le plan vertical qui contient la quille, de telle manière qu'elle contre-balance l'effet de la tige c.

Jusqu'à présent, on se contente de corriger en bloc, et par des aimants seulement, ces deux termes si différents. Il en résulte évidemment que, quand le bâtiment se déplace, [en admettant même que le magnétisme sous-permanent du navire représenté par P reste rigoureusement constant], la correction perd son exactitude, puisque les aimants donnent lieu à une force perturbatrice constante, tandis que celle qu'il s'agit de corriger varie avec Z.

Barre de Flinders. — Au commencement de ce siècle, un marin anglais, Flinders, avait étudié d'assez près les déviations anormales, produites sur le compas par les pièces verticales de fer qui se trouvaient trop près de lui, et il avait, avec beaucoup de sagacité, engagé à les corriger au moyen d'une ou plusieurs autres tiges de fer verticales, convenablement placées. On abandonna assez rapidement ce mode de correction, qui n'avait, d'ailleurs, qu'une efficacité restreinte dès que les autres forces perturbatrices étaient considérables. Sir William Thomson l'a repris dans son compas. Nous dirons plus loin comment il convient de placer cette tige à bord.

Correction du coefficient C. — Le sinus de l'arc que représente ce coefficient a pour valeur approchée :

$$\frac{1}{\lambda H}(Q + fZ),$$

par conséquent, pour l'annuler, il faut placer près du compas :

1° Un ou plusieurs aimants, tels qu'ils contre-balancent exactement l'action de l'aimant Q;

2° Une tige de fer doux verticale, capable de contre-balancer l'action de la tige f.

Mais nous avons vu que f avait, en général, une valeur nulle ou si faible, qu'il est fort difficile de la séparer de celle de Q par la méthode qui sert à séparer les valeurs de c et de P. On préfère donc ne pas en tenir compte et se borner à annuler C au moyen des seuls aimants.

Il résulte de ce que nous venons de dire pour C et B, et aussi de la variabilité de P et de Q, que la correction de la déviation semi-circulaire ne sera valable que pour le lieu où elle aura été faite, et qu'il faudra déplacer les aimants quand le bâtiment changera de position à la surface du globe.

Correction de la déviation quadrantale. — Son principe repose sur la formule monôme que nous avons donnée (p. 67) pour l'expression des deux termes de cette déviation, et qui montre que tout le fer doux du navire produit en somme sur l'aiguille du compas une déviation quadrantale égale à $\sqrt{D^2 + E^2} \times \sin 2(\zeta' + \beta)$. β étant un angle tel que

$$\tag{62} \operatorname{tang} 2\beta = \frac{E}{D},$$

compté à partir de l'axe longitudinal du navire. Cette déviation est nulle pour les valeurs de ζ' telles que $\zeta' + \beta$ soit égal à l'une des quatre valeurs 0,90,180, ou 270 degrés. Nous pouvons donc supposer (v. p. 62), que cette déviation provient d'une tige unique de fer doux horizontal faisant avec le cap du navire un angle égal à β. Or on a vu, au même endroit, que la déviation causée par une pareille tige est annulée quand on place, à la même distance du centre du compas, mais dans une direction rectangulaire, une autre tige toute semblable. Connaissant donc l'angle β au moyen des deux coefficients E et D et de la relation donnée plus haut, il nous suffira, pour annuler la déviation quadrantale produite par tout le fer doux du navire, de disposer près du compas, à une distance convenable, mais sur une direction perpendiculaire à la droite qui limite l'angle β, une masse de fer doux convenable. L'action de cette masse unique peut être évidemment remplacée par celles de deux masses plus petites, situées sur la même droite, à égale distance, mais de part et d'autre du centre du compas et cela dispense d'avoir besoin de choisir entre les deux directions qui satisfont à l'équation (62).

Le coefficient E, n'ayant de valeurs sensibles que dans des cas tout à fait exceptionnels, nous allons dire d'abord comment il convient de corriger D.

Correction du coefficient D. — Ce coefficient est toujours positif, sauf dans des cas très rares. On peut donc, en somme et en le prenant en bloc, imaginer qu'il est dû à l'influence d'une tige de fer doux *a* placée dans la position de la figure 1, planche I. Il suffit de se reporter à la figure 8 de la première partie pour voir qu'on peut contre-balancer l'influence d'une pareille tige sur le compas en plaçant près de lui les tiges *e* de la figure 5 de la planche I : tiges qui sont horizontales et perpendiculaires à la tige *a*.

Au lieu de tiges, on emploie parfois des cylindres de fer doux placés dans de petites boîtes de cuivre, ou des chaînes de fer doux. Nous croyons préférable d'employer, comme le fait sir W. Thomson, des sphères de fer doux. On est plus sûr de les obtenir parfaitement semblables, telles qu'elles s'aimantent sous l'action de la terre d'une façon parfaitement symétrique et avec une intensité suffisante pour contre-balancer l'effet du magnétisme induit horizontal du navire (v. note 3).

Si D est positif, la ligne qui joint les centres des deux sphères doit être perpendiculaire à la quille; si D est négatif, cette ligne doit être parallèle à la quille. Il suffit, pour le voir, de faire un croquis grossier en supposant que tous les autres coefficients sont nuls et que le cap de navire est au N. E. du compas. En indiquant, par des lettres ou des couleurs, la polarité magnétique des diamètres des deux sphères qui sont parallèles à l'aiguille aimantée, et en plaçant la ligne qui joint les centres des deux sphères dans l'une ou l'autre des positions indiquées plus haut, on se rend compte de la position que doivent occuper les sphères.

Correction du coefficient E. — Il provient, comme A, du fer dissymétrique *d* et *b*. En général, il n'y a pas de pareil fer à bord ou, s'il en existe, c'est en si petite quantité qu'il donne au coefficient E des valeurs égales ou inférieures à 30 minutes, qu'on néglige, parce qu'elles ne peuvent être séparées avec certitude des erreurs d'observation.

Mais pour les compas des hommes de barre, qui sont placés d'une façon dissymétrique, pour les compas des tourelles cuirassées, surtout quand ils ne sont pas placés au centre de la tourelle ou quand l'axe vertical de cette dernière n'est pas placé dans le plan diamétral longitudinal du navire, E peut prendre des valeurs considérables allant parfois jusqu'à 5 et 6 degrés. On annule alors ce coefficient, en détruisant la symétrie des sphères compensatrices de D par rapport au plan longitudinal. Il suffit pour cela d'incliner par rapport à ce plan, la droite qui joint les centres des deux sphères. Conformément à l'équation (62), si E est positif, il faut que la sphère qui se trouvera le plus sur l'avant soit à bâbord du compas; si E est négatif, cette même sphère devra, au contraire, se trouver à tribord.

On s'en rend compte, comme dans le cas précédent et en faisant le même croquis. On supposera seulement que le cap du navire est le Nord du compas.

Influence de la correction de E sur A. — En se reportant p. (63) aux valeurs de $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ et p. (161) aux relations entre ces coefficients exacts et les coefficients approchés, on voit qu'ils dépendent des mêmes tiges de fer doux, d et b; si donc le coefficient E a une valeur assez grande pour être gênante (2 degrés ou plus), et qu'on le corrige, il ne faut pas oublier que la valeur de A changera par cela même et qu'il deviendra nécessaire de la déterminer à nouveau. Quand E a des valeurs supérieures à 3 degrés, il se peut qu'en le corrigeant on donne à A des valeurs égales ou supérieures à 3 degrés; mais il est bien évident qu'il vaut mieux accepter des valeurs considérables pour A, qui est constant, que laisser subsister un coefficient E de quelque valeur, puisque celui-ci, étant multiplié par cos $2\zeta'$, donne lieu à une déviation qui change à tous les caps et varie même rapidement avec le cap du navire.

Principe de la correction de l'erreur due à la bande. — Reportons-nous à l'expression de cette erreur dans la première partie.

Le terme en g étant généralement fort petit, on le néglige.

Quant au terme en c, il disparaît, en même temps que celui contenu dans B, au moyen de la même tige de fer doux.

Il ne reste donc qu'à annuler le coefficient J ou, ce qui revient au même, la quantité $\mathfrak{D} + \frac{\mu}{\lambda} - 1$.

Pour cela, il faut que $\mu = (1 - \mathfrak{D})\lambda.$

Or, nous avons vu que $\mu = 1 + k + \frac{R}{Z}.$

Nous devons donc modifier la valeur de μ, de façon à la rendre égale à $(1 - \mathfrak{D})\lambda$, et nous pouvons y arriver en plaçant près du compas une tige verticale de fer doux, de façon à modifier k, et un aimant vertical, de façon à changer la valeur de R.

On n'introduit jamais cette nouvelle tige de fer doux; quelquefois on se contente, suivant le signe de k, de soulever ou d'abaisser un peu la barre de Flinders, qui nous a déjà servi à corriger c; il est vrai que, dans cette nouvelle position, cette barre ne produit plus son maximum d'effet comme force horizontale magnétique, mais, en revanche, elle introduit une composante verticale qui modifie k.

La séparation de k et de $\frac{R}{Z}$, dans μ, offre une difficulté analogue à celle de la séparation de c et de P, dans B, et de f et Q, dans C; on ne peut y arriver qu'en observant la valeur de μ dans deux lieux différents. En général, on se contente de modifier la valeur de μ au moyen d'un seul aimant vertical; il est donc évident que cette compensation ne sera valable que pour le lieu où on la fait, et qu'il faudra la déterminer de nouveau quand le bâtiment changera de place.

Avantages de la compensation.

Nous développerons plus loin tous les détails pratiques de l'opération.

Admettons maintenant que, grâce à l'introduction des compensateurs, tant aimants que fer doux, on ait rendu nuls les quatre coefficients B, C, D, E; la formule des déviations donne alors :

$$\delta = A,$$

ce qui veut dire qu'à tous les caps, la déviation est constante et égale à A, et que, par conséquent, la force directrice qui oriente l'aiguille à bord conserve, à tous les caps, une direction invariable.

Si d'ailleurs nous nous reportons aux deux formules 8 et 9 de la première partie, qui donnent les deux composantes de cette force directrice, nous aurons, en les élevant au carré et en nous rappelant que $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$ sont nuls :

$$H'^2 = \lambda^2 H^2 (1 + \mathfrak{A}^2).$$

$\mathfrak{A}$ est toujours nul ou très faible. Si $A = 1$ degré, $\mathfrak{A} = \frac{1}{57,3}$ et par suite son carré peut être négligé ; il reste donc :

$$H' = \lambda H.$$

ce qui veut dire qu'à tous les caps la force directrice de l'aiguille à bord est constante.

Par conséquent, la compensation supprime les variations de la force directrice, avantage essentiel sur lequel les considérations antérieures nous dispensent d'insister de nouveau.

De plus, la valeur de λ, antérieure à toute correction, est égale à $1 + \frac{a+e}{2}$, et nous savons qu'en général la valeur absolue du paramètre a est faible, tandis que celle de e, quatre ou cinq fois plus considérable, est négative. Il en résulte que λ a une valeur plus petite que 1, et d'autant plus faible que la valeur négative de e est plus grande en valeur absolue : or, l'effet des sphères de fer doux compensatrices est d'introduire un paramètre e_1 positif, dont la valeur soit telle qu'après la mise en place de ces sphères on ait :

$$a = e + e_1,$$

et par suite :

$$\lambda = 1 + a.$$

On aura donc augmenté ainsi λ, ce qui est un autre avantage.

Difficultés pratiques de la compensation. — Cette méthode si simple, fondée sur une théorie indiscutable, resta longtemps sans application générale, bien qu'elle ait été appliquée dès 1839 par l'astronome royal d'Angleterre, sir G. Airy, aux compas du *Rainbow* et de l'*Ironsides*, dont les déviations dépassaient 40 degrés en valeur absolue de part et d'autre du Nord magnétique ; pour expliquer ce fait, comme pour dissiper les préventions dont elle peut être encore l'objet, il convient de montrer quelles sont les difficultés pratiques aujourd'hui surmontées qui se sont longtemps opposées à son adoption.

Toute notre théorie et les règles de compensation qui en sont les conséquences reposent sur l'exactitude de l'expression simplifiée de la déviation au moyen de cinq coefficients et, par conséquent, sur l'exactitude de l'hypothèse fondamentale au moyen de laquelle nous l'avons obtenue, à savoir que la longueur de l'aiguille était négligeable, par rapport à la distance qui la séparait des pièces de fer les plus voisines.

Pour un compas dont le centre était dans le plan longitudinal du navire et à une distance de $2^m,50$ environ du fer le plus voisin, tandis que son aiguille avait 15 centimètres environ de longueur, l'hypothèse était suffisamment vérifiée pour que ses conséquences fussent exactes.

La formule des déviations fut donc acceptée rapidement et rendit de suite d'incontestables services. Mais il en fut autrement quand on voulut passer à la compensation des compas.

Pour contre-balancer l'action magnétique parfois puissante du navire, on est fréquemment obligé de rapprocher beaucoup, du compas, les correcteurs, tant aimants que fer doux. La distance de l'aiguille aux correcteurs n'était plus, dès lors, suffisante pour qu'on pût considérer l'hypothèse fondamentale comme satisfaite et la formule des déviations comme exacte.

L'action des aimants correcteurs sur la rose introduirait, non seulement des termes en B et en C, mais, comme nous l'avons vu dans la première partie, les termes $F \sin 3\zeta'$ et $G \cos 3\zeta'$, qui représentent une erreur sextantale.

De même, le voisinage trop rapproché du fer doux correcteur introduisait, non seulement les termes en D et E nécessaires pour la correction, mais encore (v. première partie) les termes $H \sin 4\zeta'$ et $K \cos 4\zeta'$, qui représentent une erreur octantale.

Si donc on arrivait à diminuer notablement ou même à faire disparaître les erreurs semi-circulaires et quadrantales, on introduisait en revanche des erreurs sextantales et octantales, plus gênantes que les premières, puisqu'elles varient plus rapidement quand le navire change de cap.

D'ailleurs, la faible distance de l'aiguille aux cylindres ou chaînes de fer doux, alors employés, avait encore un autre désavantage.

Le magnétisme de cette aiguille agissait sur le fer doux correcteur, et ce dernier n'était plus aimanté par la seule action de la terre, mais aussi par l'action magnétique, essentiellement variable avec le cap, qui résultait de l'influence réciproque de l'aiguille et des correcteurs de fer doux.

L'imperfection de la correction de la déviation quadrantale devenant ainsi notoire, on se contentait alors d'essayer de corriger la déviation semi-circulaire. Dans certains cas, cette dernière correction était imparfaite pour les mêmes raisons, et, dans les cas même où elle était à peu près complète, elle n'était exacte que pour le lieu où elle avait été faite. La variabilité des coefficients B et C, qu'elle était destinée à corriger, exigeait que l'on déplaçât les aimants dès que le navire changeait un peu notablement de place.

Or, les habitacles n'étaient pas disposés pour permettre ce déplacement aisé des aimants; en général on se contentait de clouer ceux-ci sur le pont, après des tâtonnements souvent assez longs pour inspirer une crainte fondée d'avoir à les recommencer. On préférait donc laisser les aimants à poste fixe où ils étaient, courant le risque, malgré le soin avec lequel ils étaient emmaillotés de feutre et de cuivre, de voir leur intensité magnétique changer notablement par suite de l'action de l'eau de mer sur les aimants dès qu'elle pénétrait jusqu'à eux. Dans ces conditions, il ne restait plus qu'à constater que ces aimants n'annulaient ni même ne diminuaient les déviations, et on prenait la résolution pour l'avenir de ne pas chercher à obtenir la correction de la déviation semi-circulaire, plus que celle de la déviation quadrantale.

On mit pendant longtemps ces divers insuccès sur le compte d'une théorie qui, mieux connue, les expliquait, au contraire, complètement et donnait à la pratique des indications précieuses pour surmonter les difficultés qu'elle rencontrait.

CHAPITRE III

DÉTAILS DES OPÉRATIONS A FAIRE POUR COMPENSER LES COMPAS

Nous distinguerons trois cas différents :

1[er] Cas. On connaît, pour le compas qu'on veut corriger, les cinq coefficients A, B, C, D, E de la déviation.

2[e] Cas. On ne connaît pas les cinq coefficients, mais on peut faire exécuter au navire un tour entier d'horizon, soit aux coffres de régulation, soit au moyen d'un remorqueur, soit en grande rade pendant les essais de machines.

3[e] Cas. On ne connaît pas les cinq coefficients, mais on a assez de temps devant soi en rade pour n'avoir pas besoin de faire exécuter au navire un tour d'horizon par le moyen d'aussières ou d'un remorqueur, et se contenter de compenser le compas en se servant de l'évitage naturel du navire, sous l'action du vent ou du courant, et par tâtonnements successifs.

Ces trois questions n'offrent aucune difficulté ; il suffit, pour les résoudre, d'avoir sous les yeux les huit équations que nous avons données à la fin de la deuxième partie et qui expriment la déviation aux huit rumbs principaux du compas.

1[er] Cas. — Dans ce cas, si les coefficients A et E sont assez petits pour pouvoir être négligés dans la compensation, trois caps, dont deux cardinaux et adjacents, et le troisième intercardinal ou quadrantal, suffiront pour placer convenablement les correcteurs.

En effet, supposons que nous soyons en rade et que nous ayons, par la visée d'un objet terrestre, ou d'un astre, la direction du Nord magnétique; amenons le cap du navire au moyen d'aussières, d'un remorqueur, ou en profitant de l'évitage naturel, à faire, avec cette direction, un angle égal à A + E. Dans cette position du navire, plaçons et manœuvrons les aimants transversaux de façon que le Nord du compas coïncide avec le cap de navire; à ce moment nous avons en vertu de la formule :

$$\delta = A + B\sin\zeta' + C\cos\zeta' + D\sin 2\zeta' + E\cos 2\zeta',$$

et puisque $\zeta' = 0$,

$$\delta_0 = A + C_1 + E,$$

en appelant C_1 ce qu'est devenu le coefficient C après l'introduction des aimants correcteurs.

Mais puisque, par le relèvement, nous savons que δ_0 est égale seulement à A + E, il en résulte que l'on a : $C_1 = 0$.

Amenons ensuite le cap du navire vers l'Est ou l'Ouest magnétique, prenons l'Est pour fixer les idées, et dans une position telle qu'il fasse avec cette direction un angle égal à A — E; plaçons et manœuvrons alors les aimants longitudinaux de façon que l'Est de la rose coïncide avec le cap du bâtiment; dans cette position nous avons, d'après le même raisonnement que dans le paragraphe précédent :

$$\delta_8 = A - E,$$

c'est-à-dire :

$$B_1 = 0,$$

en appelant B_1 ce qu'est devenu le coefficient B après l'introduction des aimants longitudinaux.

L'emploi des aimants, tant longitudinaux que transversaux, est fondé sur la remarque suivante, que chacun peut mettre en évidence par un croquis très simple.

La résultante des actions exercées par les deux pôles d'un aimant sur une molécule magnétique située, soit dans le plan perpendiculaire à l'aimant et élevé en son milieu, soit à une distance telle de l'aimant qu'on puisse considérer ses distances aux deux pôles comme égales, est dirigée suivant une parallèle à la direction même de l'aimant. C'est pour cela qu'on emploie des aimants longitudinaux pour compenser la force perturbatrice P, dirigée suivant la quille, et des aimants transversaux pour compenser la force perturbatrice Q, dirigée suivant la perpendiculaire à la quille (v. partie 1, ch. I).

Cela fait, amenons le cap du bâtiment à faire, avec la direction du N.-E. magnétique, un angle égal à A. Quand il est dans cette position, approchons ou éloignons des sphères de fer doux d'un diamètre suffisant, de façon que le N.-E. du compas coïncide avec le cap du bâtiment; on aura alors :

$$\delta_4 = A,$$

c'est-à-dire :

$$D_1 = 0$$

en appelant D_1 ce qu'est devenu le coefficient D par l'introduction des sphères compensatrices.

Par conséquent, la formule des déviations du compas ainsi corrigé sera :

$$\delta = A + E \cos 2\zeta'.$$

En général, E est négligeable; A ne dépasse pas 2 degrés. On pourra, soit en tenir compte par le calcul, soit les corriger comme nous l'avons dit plus haut, dans le chapitre II.

2e Cas. — C'est celui qui se présente le plus fréquemment dans la pratique. Au moment où le bâtiment n'a plus que les derniers préparatifs à faire avant de prendre la mer, on le mène en rade et on s'occupe, soit de dresser sa table de déviations, soit de compenser ses compas, en faisant exécuter au navire un tour entier d'horizon.

Voici comment il faut opérer dans ce cas où l'on n'a pas les cinq coefficients de la déviation :

1° Le cap du navire étant au Nord magnétique, on manœuvre les aimants transversaux de façon que le Nord du compas coïncide avec le Nord magnétique; on a alors, d'après la formule générale et puisque $\zeta = 0$:

$$\delta_0 = 0 = A + C_1 + E.$$

2° On amène le cap du navire sur l'Est magnétique, on attend quatre à cinq minutes avant de prendre les relèvements, et on manœuvre les aimants longitudinaux de façon que l'Est de la rose coïncide avec le cap ; dans cette position, on a évidemment :

$$\delta_8 = 0 = A + B_1 - E.$$

En général, après ces deux opérations, les deux coefficients de la déviation semi-circulaire auront des valeurs absolues moindres que 3 degrés.

3° On continuera à faire abattre le navire sur tribord, on l'arrêtera au cap Sud-Est magnétique; après avoir attendu encore quatre à cinq minutes, on calculera la déviation du compas; si elle est supérieure à 7 ou 8 degrés, on la réduira à cette valeur absolue, *sans la faire changer de signe,* au moyen des sphères compensatrices, et, si on appelle δ_{12} la valeur de la déviation après l'introduction des sphères, on aura évidemment :

$$\delta_{12} = A + \alpha B_1 - \alpha \tag{63}$$

en appelant α la valeur commune du sinus et du cosinus naturels de l'arc de 45 degrés.

Puis, le navire continuant à abattre, on l'arrêtera quelques minutes et successivement sur les caps Sud, Sud-Ouest et Ouest.

A chacun de ces caps, on observera la déviation et on aura les trois équations suivantes :

$$(64) \qquad \left\{ \begin{aligned} \delta_{16} &= A - C_1 + E, \\ \delta_{20} &= A - \alpha B_1 - \alpha C_1 + D_1, \\ \delta_{24} &= A - B_1 - E. \end{aligned} \right.$$

Cinq seulement des équations précédentes seraient nécessaires pour avoir les valeurs des coefficients qu'il nous faut avoir; mais nous avons ajouté la sixième parce qu'elle simplifie notablement le calcul.

Nous obtenons ainsi, en laissant δ_0 et δ_6 pour la symétrie des formules, bien que ces quantités soient nulles dans ce cas :

$$A = \frac{\delta_0 + \delta_6 + \delta_{16} + \delta_{24}}{4} \qquad B_1 = \frac{\delta_8 - \delta_{24}}{2}, \qquad D_1 = \frac{\delta_{20} - \delta_{12} + 2\alpha B_1}{2}$$

$$E = \frac{\delta_0 + \delta_{16}}{4} - \frac{\delta_8 + \delta_{24}}{4} \qquad C_1 = \frac{\delta_0 - \delta_{16}}{2}.$$

Sauf dans des cas exceptionnels, E a une valeur inférieure à 1°,30' et on ne le compense pas. Mais, s'il avait une valeur sensible, 2° ou plus, par exemple, il faudrait alors calculer l'angle β de l'équation 62, afin d'incliner convenablement la ligne des centres des sphères compensatrices.

Les valeurs de ces coefficients étant ainsi obtenues par un calcul qui demande à peine quelques minutes, et tandis que le bâtiment est encore au cap Ouest magnétique, on déplace les aimants longitudinaux de façon que l'on ait à ce cap, pour nouvelle déviation :

$$\delta'_{24} = A - E.$$

Et on sait alors que la nouvelle valeur B_2, du coefficient B, est égale à zéro.

On continue alors à faire tourner le navire, on l'arrête au cap N.-O. magnétique, et on déplace les sphères compensatrices de façon que :

$$\delta_{28} = A + \alpha C_1.$$

On sait alors que le coefficient D_1 est nul.

En continuant le tour d'horizon, on arrête de nouveau le bâtiment au cap Nord magnétique, et on déplace alors les aimants transversaux, de façon que la nouvelle déviation à ce cap :

$$\delta'_0 = A + E.$$

Et on a ainsi annulé le coefficient C_1.

La formule de la déviation est donc réduite à la forme simple :

$$\delta = A + E \cos 2\zeta'.$$

Remarques pratiques. — Il est bien évident qu'on pourra partir de tout autre cap cardinal que le Nord, et faire abattre le navire sur bâbord, et non sur tribord. On se laissera guider, pour le choix du point de départ et le sens de la rotation, par la facilité plus ou moins grande que le vent et le courant laisseront à la manœuvre. De même, nous avons dit qu'on mettait le cap du bâtiment sur des directions exactes. Il est clair qu'il suffira, dans la pratique, qu'il soit à 1 ou 2 degrés près des directions magnétiques indiquées. Il sera inutile de passer un temps considérable à vouloir atteindre, dans des circonstances de manœuvre défavorables, une exactitude mathématique, illusoire d'ailleurs avec les procédés et erreurs ordinaires d'observation. Il faut seulement bien faire attention de prendre les équations qui conviennent, et se rappeler que chacune des lettres qui expriment un coefficient emporte avec elle le signe de ce coefficient.

Exemple. — Si B, par exemple, est égal à — 12 degrés, il faudra, dans toutes les équations, remplacer $+B$ par -12 et $-B$ par $+12$. Et ainsi pour les autres coefficients.

Il faut, bien entendu, en plaçant les aimants correcteurs, avoir égard aux prescriptions de M. Gaussin (v. p. 79) toutes les fois que l'on pourra craindre que la rapidité de la rotation du navire n'ait introduit des coefficients $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ dits apparents.

3e Cas. — Ce que nous venons de dire des deux premiers cas nous montre ce que nous devrons faire quand nous voudrons compenser le compas, en nous servant seulement des évitages naturels du bâtiment, et par tâtonnements successifs.

Nous commencerons à placer les aimants longitudinaux, quand le cap du bâtiment sera près de l'E. ou de l'O. magnétiques, et les aimants transversaux quand ce cap sera près du Nord ou du Sud magnétiques.

Si on craint de ne pouvoir atteindre exactement ces caps, on placera les deux systèmes d'aimants quand le cap du navire sera à 10 degrés près de l'une de ces directions magnétiques : on amènera ainsi les coefficients B et C à avoir de moindres valeurs, mais il est évident qu'une pareille compensation n'est que grossièrement approximative et que, si on ne peut la compléter en opérant à 1 ou 2 degrés près de deux caps cardinaux magnétiques quelconques, mais non diamétralement opposés, il sera indispensable de former une table de déviations.

Mais, en général, on aura le temps nécessaire pour observer les valeurs des déviations aux quatre caps cardinaux ou à des caps très voisins, et les quatre équations correspondantes de la partie 2 (ch. VI) nous donneront les valeurs des quatre coefficients A_1, E_1, B_1, et C_1.

On achèvera alors la compensation en profitant de la connaissance des coefficients A_1 et E_1 pour changer la place des aimants compensateurs, comme nous l'avons montré dans le cas précédent, de façon à annuler les coefficients B_1 et C_1.

Ayant ces valeurs, il suffira à un cap magnétique quadrantal quelconque, prenons le N.-E. pour fixer les idées, de réduire la déviation au moyen des sphères de fer doux, de façon que :

$$\delta_4 = A + \alpha(B_1 + C_1),$$

et on sera assuré que la déviation quadrantale est alors corrigée.

On peut d'ailleurs, quand on a corrigé grossièrement les déviations, de façon qu'elles soient plus petites que 20 degrés en valeur absolue, compenser exactement la déviation quadrantale, c'est-à-dire annuler le coefficient D, en déterminant par l'observation la déviation aux quatre caps quadrantaux *du compas*.

On a, en effet, les quatre équations suivantes :

pour le N. E. $\quad \delta_4 = A + (B_1 + C_1)\alpha + D,$

pour le S. E. $\quad \delta_{12} = A + (B_1 - C_1)\alpha - D,$

pour le S. O. $\quad \delta_{20} = A - (B_1 + C_1)\alpha + D,$

pour le N. O. $\quad \delta_{28} = A - (B_1 - C_1)\alpha - D,$

d'où : $$D = \frac{\delta_4 - \delta_{12} + \delta_{20} - \delta_{28}}{4}.$$

Le signe de cette moyenne indique si D est positif ou négatif, c'est-à-dire si les sphères compensatrices doivent être placées transversalement ou longitudinalement. Sa valeur absolue donne la grandeur de D, et fixe la distance qui doit exister entre les centres des deux sphères compensatrices, et le centre de la rose.

Remarques pratiques. — Quand on veut se servir seulement de l'évitage naturel du bâtiment pour compenser les compas et qu'on a du temps devant soi, on se procure aisément les valeurs des cinq coefficients en observant les déviations à des caps quelconques, mais assez nombreux pour qu'on puisse construire une bonne courbe de déviations (v. p. 116); on relève alors sur cette courbe les valeurs des déviations aux caps cardinaux et quadrantaux dont on a besoin pour effectuer la compensation.

Mais, quand on opère par tâtonnements et sans avoir aucun indice sur les valeurs des coefficients, il convient de procéder par approximations successives, c'est-à-dire de diminuer successivement la valeur de chacun des coefficients, sans risquer de la faire changer de signe.

Pour cela, on placera les aimants de façon, non pas à annuler tout à fait les déviations aux caps cardinaux, mais à les réduire à 2 ou 3 degrés au plus, sans les faire changer de signe; on aura ainsi plus de chance de ne pas être forcé de revenir sur ses pas. La forme des huit équations principales explique aisément la raison de ces précautions et la nécessité de tâtonnements successifs.

Ainsi que nous l'avons dit plus haut, on peut commencer à placer les aimants, dès que le cap du navire n'est pas éloigné d'un point cardinal magnétique de plus de 15 degrés.

On ne touche que les aimants transversaux, quand le cap est voisin du Nord ou du Sud magnétiques, et les aimants longitudinaux seuls, quand le cap est voisin de l'Est ou de l'Ouest, et il faut, comme nous l'avons rappelé plus haut, et, pour les mêmes raisons, avoir égard aux prescriptions de M. Gaussin, si la rotation du navire pour arriver à ces caps a été assez rapide.

Dans chaque cas particulier on comprend très aisément l'action d'une sphère sur la rose si, par la pensée, on la suppose réduite à celui de ses diamètres horizontaux qui est parallèle au méridien magnétique et prend sous l'influence terrestre un pôle rouge à son extrémité Nord, et un pôle bleu à son extrémité Sud.

CHAPITRE IV

Compas de sir William Thomson. — Appareils auxiliaires. Théorie et emploi du Miroir azimutal.

A la fin de la première partie, nous avons énuméré toutes les conditions que doit remplir un bon compas et démontré, dans la quatrième, que, pour pouvoir appliquer la méthode de la compensation avec succès, il fallait, avant tout, que les aiguilles aimantées fussent assez petites pour qu'on pût négliger leur longueur sans commettre une inexactitude notoire, et que l'intensité de leur magnétisme fût assez faible pour qu'il n'y eût pas d'influence réciproque entre les aiguilles et les correcteurs de fer doux.

C'est en cherchant à remplir toutes les conditions imposées par la théorie, que sir W. Thomson est parvenu, en 1878, après trois années d'essais sur son yacht *LallaRookh*, à imaginer un compas qui nous paraît destiné à devenir bientôt d'un usage général, et qui, d'ailleurs, a déjà fait ses preuves par une pratique de trois années à bord des bâtiments les plus divers, yachts, grands steamers et navires de guerre cuirassés des différentes nations.

Le but principal que s'est proposé l'inventeur a été de rendre la correction de la déviation quadrantale, imaginée par sir Airy, réel-

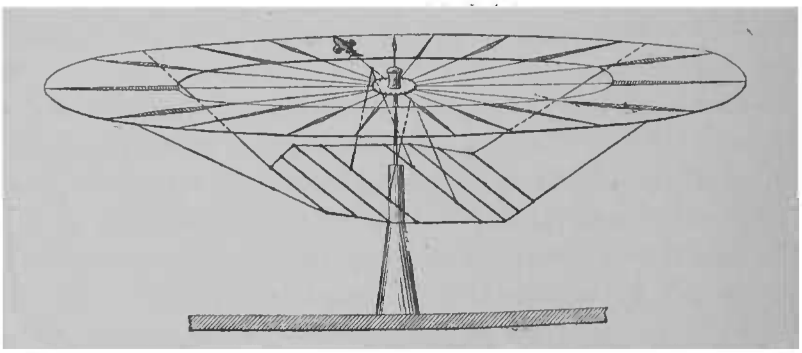


Fig. 29.

lement possible, pratique et exacte. Il s'est efforcé ensuite de rendre sa rose stable à la mer par gros temps.

Rose (*fig.* 29). — La partie essentielle et vraiment originale de ce compas consiste dans sa rose, qui est extrêmement légère. Une rose

Thomson de 25 centimètres de diamètre est orientée par huit petites aiguilles (quatre de chaque côté du centre), faites en fil d'acier très fin, du diamètre des fines aiguilles à tricoter. Elles ont de 5 à 8 centimètres de longueur et pèsent en tout 3 grammes et demi.

Dans les roses de même diamètre des compas ordinaires, la longueur des aiguilles oscille entre 14 et 18 centimètres, d'où un grand avantage pour la compensation en faveur de la rose Thomson.

Ces aiguilles sont fixées, comme les échelons d'une échelle, à deux fils de soie parallèles, et elles sont suspendues, par des fils de soie passant par les yeux qui terminent leurs extrémités, au système matériel qui porte la rose des vents.

Le poids total de la rose (chape, fils de soie, papier portant les divisions, aiguilles, cercle d'aluminium extérieur, etc.), est de 12 grammes environ; c'est le dixième environ du poids des roses ordinaires de même diamètre, ce qui donne à la rose de sir W. Thomson un grand avantage au point de vue des erreurs dues au frottement, et aussi de l'usure des chapes et pivots. L'erreur due au frottement, c'est-à-dire la différence entre la ligne Nord-Sud magnétique et la direction marquée, à terre, par l'aiguille, quand elle est revenue, par une série d'oscillations, à sa position d'équilibre, après en avoir été écartée au moyen d'un aimant est, pour une rose Thomson, de un quart de degré environ.

Outre sa légèreté extrême, cette rose se distingue encore par le faible moment magnétique total de ses huit aiguilles, qui n'est que le $\frac{1}{12}$ du moment magnétique des roses ordinaires, ce qui comporte deux avantages.

D'abord, la période d'oscillation complète de cette rose, dérangée de sa position d'équilibre, est d'environ 40 secondes, près du triple de la période d'un compas ordinaire de même dimension, et cela favorise la stabilité de la rose à la mer; ensuite il n'y a pas d'induction réciproque entre les correcteurs de fer doux et les aiguilles, et la correction de la déviation quadrantale peut ainsi être parfaite.

Enfin l'extrême légèreté de la rose, sa construction au moyen de fils de soie, lui donnent une élasticité considérable qui la met dans des conditions très favorables pour résister aux chocs accidentels produits par le tir des bouches à feu, et c'est un avantage capital pour les compas destinés à servir à bord des navires de guerre. Afin que la chape ne quitte pas le pivot par suite de chocs, on a eu soin de la recouvrir d'un chapeau qui lui laisse toute liberté pour se mouvoir avec la rose, mais qui, ne lui permettant qu'un faible déplacement quand elle est projetée, l'oblige à revenir sur le pivot sans toutefois tomber sur lui avec assez de force pour l'endommager. Il est inutile d'ajouter qu'il faut fréquemment visiter le pivot et la chape, et toujours après les tirs, afin de les changer s'il y a lieu.

Nous devons ajouter d'ailleurs que les tirs effectués en 1880 et 1881 par l'escadre d'évolutions de la Méditerranée, commandée par M. le vice-amiral Garnault, n'ont pas entraîné d'avarie dans les organes de ces nouveaux compas.

Sir William Thomson a de plus disposé son compas pour que la compensation puisse se faire aisément et rapidement.

Habitacle. — L'habitacle du compas est en bois; il se fixe au pont au moyen de quatre boulons formant carré, de façon qu'on puisse changer aisément son orientation et placer ainsi la barre de Flinders et les sphères compensatrices, suivant qu'il convient aux signes de c et de D.

On a creusé, à différentes hauteurs, dans cet habitacle, une dizaine de logements pour chaque système d'aimants, longitudinal et transversal. On peut ainsi placer et déplacer très facilement les aimants correcteurs, qui sont d'ailleurs sous clef, de façon que seul l'officier des montres puisse modifier leur position. Les aimants longitudinaux doivent être mis par couple, symétriquement par rapport au compas. On a adopté cette disposition pour que l'influence réciproque des aimants correcteurs et de la barre de Flinders soit nulle ou très faible, ce qui n'avait pas lieu dans le premier modèle des compas de sir W. Thomson, où la correction de la déviation semi-circulaire était effectuée au moyen d'un seul système d'aimants, oblique par rapport à la quille et mobile autour d'un axe vertical de façon à compenser la force polaire du navire $\sqrt{\mathfrak{B}^2 + \mathfrak{C}^2}$.

La compensation de la déviation quadrantale se fait au moyen de sphères creuses de fer doux, dont le diamètre est d'autant plus grand et la distance au centre de la rose d'autant plus petite, que D est plus grand. Pour rendre plus rapide la pose de ces sphères, sir W. Thomson a réuni dans une table les valeurs du coefficient D, qu'annulent les globes de différents diamètres, placés à différentes distances.

Ces sphères glissent sur les bras horizontaux de deux potences, placées de chaque côté de l'habitacle. Ces bras sont percés chacun d'une rainure dans laquelle glisse la tige à vis, qui permet de fixer la sphère à la distance voulue et ils sont en fer de façon à introduire des coefficients e positifs et à servir ainsi à la correction quadrantale.

Telle est la disposition du compas ordinaire, de celui où, comme c'est le cas général, on n'a à se préoccuper que d'annuler D. Mais si on sait d'avance, par la position que doit occuper le compas, que le second coefficient de la déviation quadrantale E ne sera pas négligeable et qu'il faudra également l'annuler, on ajuste ces deux potences à un fort anneau de bronze mobile autour de l'habitacle, et on peut placer alors la ligne qui joint les centres des deux sphères dans telle direction qu'il convient.

Quant à la déviation due à la bande, elle se compense en plaçant un ou plusieurs aimants dans une gaine cylindrique de cuivre, qui monte ou descend au moyen d'une chaîne de cuivre dans un trou cylindrique vertical, pratiqué sous le centre de la rose.

Appareils auxiliaires. — Pour faciliter l'application pratique de la compensation, sir W. Thomson a imaginé encore deux appareils spéciaux, auxiliaires très précieux de son compas.

Aiguille d'inclinaison (*fig.* 12 *ter*). — Nous avons déjà donné (*Intr. prél.* page 39) la description et l'emploi de l'un d'eux, nommé *Aiguille d'inclinaison* (Dipping needle), à l'aide duquel on obtient rapidement le rapport des intensités des deux forces magnétiques verticales, ce qui permet de compenser aisément la déviation due à la bande, sans faire incliner le navire.

Déflecteur (*fig.* 12 *bis*). — Le second appareil, plus important de beaucoup que l'aiguille d'inclinaison, s'appelle le *Déflecteur*. Nous en parlerons tout à l'heure d'une manière spéciale, nous avons donné sa description et son principe dans l'*Intr. prél.* (p. 37); grâce à lui, on peut dire que la compensation du compas, ou le calcul des coefficients de la déviation quand on ne peut relever aucun objet terrestre ou céleste, c'est-à-dire par temps de brume, sont devenus des procédés assez simples et assez sûrs, pour pouvoir passer dans la pratique des observations courantes.

Miroir azimutal (*fig.* 30). — Enfin, sir W. Thomson a inventé un troisième appareil qu'il appelle *Miroir azimutal,* et qui est destiné à donner rapidement les relèvements d'astres ou d'objets, avec une grande précision.

Cet instrument consiste essentiellement en une alidade qu'on place sur la glace qui recouvre le compas et qui est centrée sur ce dernier au moyen d'un pivot vertical p; on la fait tourner autour de ce pivot jusqu'à ce qu'elle soit dirigée vers l'objet à relever.

Un petit niveau à bulle d'air *n*, placé sur l'alidade, indique si la glace du compas est bien horizontale, c'est-à-dire si la suspension à la Cardan fonctionne assez bien pour qu'on puisse avoir un relèvement précis, même quand l'objet est à une grande hauteur au-dessus de l'horizon; car il est aisé de voir que, si l'objet est sur l'horizon même, une erreur de niveau considérable ne donne pas d'erreur sensible dans le relèvement.

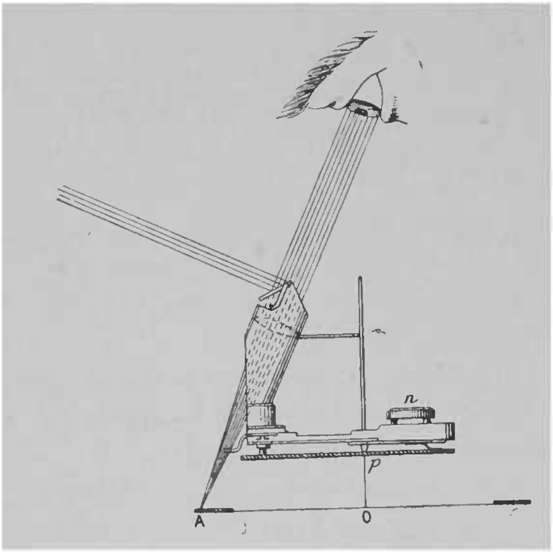


Fig. 30.

Sur l'alidade horizontale, se trouve fixé dans une position inclinée un tube cylindrique qui sert de monture à une lentille, à travers laquelle l'observateur doit viser et lire les divisions de la rose. Au-dessus de la lentille, un miroir mobile autour d'un axe horizontal, peut être manœuvré au moyen d'un bouton, de façon que l'image de l'objet visé, réfléchi dans la glace, vienne se placer sur les divisions de la rose A et en donner ainsi le relèvement demandé.

Imaginé d'abord simplement pour donner la possibilité de relever les objets cachés à la vision directe par les sphères compensatrices, cet appareil doit à l'esprit ingénieux du savant physicien qui l'a inventé divers avantages que nous allons faire connaître, et qui en font un instrument de relèvement très précis, tout en restant très pratique.

Pour avoir un bon relèvement, c'est-à-dire un azimut exact, avec cet appareil, il faut évidemment, la rose étant supposée horizontale, que l'œil de l'observateur, le centre de la rose et l'objet à relever soient dans un même vertical, et, de plus, que le miroir mobile ou, ce qui revient au même, l'axe horizontal autour duquel il tourne, soit perpendiculaire à ce vertical.

Quand, la première condition étant remplie, on déplace légèrement le miroir en azimut, de façon toutefois que l'objet reste toujours dans le champ du miroir, l'image de l'objet se déplace sur la rose et, par suite, on a une erreur dans le relèvement.

Nous supposerons, ce qui est vrai dans la pratique, que le constructeur livre l'instrument dans des conditions telles que l'axe de l'alidade horizontale, qui porte tout l'appareil, est perpendiculaire à l'axe, autour duquel tourne le miroir mobile. Dans ces conditions, si l'axe de l'alidade horizontale est écarté de 1, 2 ou 3 degrés du plan du vertical de l'objet visé, il est clair que l'axe du miroir mobile sera également écarté de 1, 2 ou 3 degrés de la perpendiculaire à ce vertical, avec laquelle il devrait coïncider pour nous donner un relèvement exact.

Évaluation des erreurs commises dans les relèvements. — Il convient évidemment de savoir quelle erreur dans le relèvement correspond à une erreur d'azimut donnée dans la position du miroir ou de l'alidade horizontale. Pour y arriver, nous allons, en analysant de près les conditions de l'observation, chercher quel est l'espace qui sépare sur la rose les images de deux objets A et B, quand, l'angle de leurs verticaux restant invariable et égal à 1 degré, on suppose qu'ils s'élèvent, en partant de l'horizon et en restant toujours dans un même plan horizontal.

Il est clair que la distance horizontale qui les sépare diminue de plus en plus, et que par suite leurs images vues dans le miroir se rapprochent de plus en plus, à mesure que les objets s'élèvent.

La distance des deux objets, comme celle de leurs deux images, est proportionnelle à cos x, si on appelle x la hauteur commune des deux objets au-dessus de l'horizon.

Par conséquent, si nous évaluons la distance de ces deux images au moyen d'une longueur fixe, nous la trouverons de plus en plus faible.

De cette distance des deux images virtuelles vues par réflexion dans le miroir, on passe à l'évaluation de la distance angulaire au moyen des divisions d'une circonférence graduée qui est vue, non pas à l'œil nu, mais à travers une lentille grossissante. La circonférence étant placée entre cette lentille et son foyer principal, mais tout près de ce dernier, il en résulte qu'on en obtient une image agrandie. Si le rayon de la circonférence est précisément égal à la distance focale de la lentille, d'après une théorie élémentaire d'optique, on peut considérer comme égaux les angles ayant pour sommets, les uns le centre de la lentille, les autres celui de l'œil, et s'appuyant respectivement, les premiers sur les divisions mêmes de la rose, les seconds sur les images de ces divisions, il en résulte que la valeur angulaire des divisions de la circonférence ne sera affectée ni par le grossissement, ni par le déplacement du point d'où on les regarde. Par conséquent nous obtiendrons pour la distance angulaire de nos deux objets A et B, situés très loin sur l'horizon, la même valeur, soit que nous les visions directement au moyen d'une alidade à pinnules ayant même centre que la circonférence, soit que nous en rejetions, au moyen d'un miroir, les images virtuelles dans le prolongement des rayons visuels allant de l'œil aux divisions agrandies de la rose.

Il n'en serait évidemment pas de même, si le rayon de la circonférence n'était pas précisément égal à la distance focale f de la lentille. Supposons, en effet, que dans le plan même de cette première circonférence de rayon f, nous en tracions deux autres, la touchant, mais ayant pour rayons respectifs, l'une $R > f$, l'autre $r < f$. L'effet de grossissement de la lentille étant le même pour ces trois circonférences, il en résulte qu'en les regardant à travers la loupe, la division de 1 degré de la circonférence R sera plus grande que la division de 1 degré de la circonférence f, qui à son tour sera plus grande que la division correspondante de la circonférence r. En évaluant la distance angulaire de nos deux objets A et B au moyen des images de ces circonférences, on serait donc conduit à la trouver plus petite que 1 degré, d'après les divisions de R, plus grande, au contraire, que 1 degré, d'après les divisions de la circonférence r.

Ce que nous venons de dire montre que si, voulant obtenir l'azimut de l'objet A, on place l'alidade, non pas dans le plan vertical de A, mais dans celui de B, on commettra dans le relèvement de A une erreur qui dépendra, et de la hauteur des deux points au-dessus de l'horizon, et du rapport qui existe entre le rayon de la circonférence et la distance focale. Pour des objets situés à l'horizon, cette erreur serait nulle si ces deux dernières quantités étaient égales. Si donc on ne devait relever avec cet instrument que des objets dans cette position, c'est cette égalité qu'il faudrait prendre pour base de la construction de l'appareil.

Mais, pour déterminer la position du navire et la variation du compas, les plus usuels des relèvements à prendre sont ceux d'objets ou d'astres situés de 0 à 50 degrés de hauteur et en moyenne de 25 à 30 degrés.

Sir W. Thomson a donc préféré accepter qu'une erreur d'orientation dans l'alidade donnât une légère erreur dans le relèvement d'objets à l'horizon, et profiter de cette erreur même pour rendre nulle celle qu'un défaut d'orientation produit sur les relèvements d'astres situés à la hauteur moyenne de 27°, et très faibles celles qui entachent les relèvements d'astres situés de 0 à 50 degrés. Il y arrive, en donnant à la distance focale de la lentille une longueur égale à $r \times 1{,}12$, r étant le rayon de la rose.

Examinons, en effet, ce qui se passe quand cette condition est remplie. Prenons nos deux objets A et B à l'horizon, leurs images, ramenées sur l'image de la rose vue à travers la lentille, seront distantes de $1° + 0{,}12$ de degré, car la longueur de chaque division de notre rose est évidemment égale à la longueur de la division de la circonférence normale qui aurait pour rayon la distance focale même de la lentille, multipliée par $\frac{1}{1{,}12}$.

D'où cette conséquence que si, en voulant relever l'objet A à l'horizon, on oriente l'alidade dans le vertical de B situé à 1 degré du vertical de A, l'image de l'objet A, au lieu d'occuper la place qui correspondrait à son relèvement exact, sera à $0°{,}12$ de cette place.

On voit qu'il faudrait une erreur d'orientation de 4 degrés pour que l'erreur, sur le relèvement de A, fût égale à $4 \times 0°{,}12$ ou 1 demi-degré environ, ce qui est la limite de l'exactitude qu'on peut jusqu'à présent se flatter d'obtenir, avec les moyens employés actuellement à bord, pour les observations d'azimut.

Cette erreur diminue à mesure que l'objet A s'élève au-dessus de l'horizon, car l'intervalle linéaire qui sépare les images de nos deux objets A et B est proportionnel à $\cos x$, et sera évidemment égal à 1 degré de la rose, quand on aura $\cos x = \frac{1}{1{,}12}$ ou $x = 27$ degrés environ.

A partir de cette hauteur, on aura une erreur de relèvement en sens inverse de la précédente, puisque l'intervalle des images de nos deux objets, étant proportionnel à $\cos x$, deviendra moindre qu'une division de la rose; cette erreur aura pour expression :

$$\frac{1}{1{,}12} - \cos x, \text{ ou : } 0{,}892 - \cos x.$$

Quand l'astre A sera à 38 degrés au-dessus de l'horizon, cette expression montre que l'erreur de relèvement correspondant à une erreur d'azimut de 1 degré, sera égale à $0{,}892 - 0{,}788$, ou : $0{,}10$, c'est-à-dire environ ce qu'elle était quand A était à l'horizon, mais en sens inverse. Pour $x = 60$ degrés et pour cette même erreur de 1 degré d'orientation, l'erreur, dans le relèvement, est égale à $0,892 - 0,40$ ou environ 0,5 soit $\frac{1}{2}$ degré. Elle croît rapidement à partir de cette distance.

Nous renvoyons ceux de nos lecteurs qui désireraient des détails plus complets sur ce sujet, à un article publié dans le numéro de mars 1881 de la *Revue maritime et coloniale* par M. Piaud, ingénieur des constructions navales (v. note V).

Recommandations pratiques. — Pour éviter l'erreur de relèvement qui correspond à cette erreur d'azimut, on a disposé, à l'extrémité de l'alidade dirigée vers l'objet, une petite pointe rouge que le constructeur a fixée sur une perpendiculaire à l'axe de rotation du miroir. En amenant l'image de l'objet relevé à coïncider avec cette pointe rouge, on est sûr de la parfaite orientation du miroir et, par suite, d'éviter toute erreur dans le relèvement.

Mais on voit qu'on n'est pas obligé de s'astreindre à cette orientation, tant que l'astre visé est à une hauteur moindre que 45 degrés.

On peut donc, quand cette dernière condition est remplie, prendre le relèvement très rapidement dès que l'objet est dans le champ du miroir, et c'est un grand avantage à la mer par mauvais temps, alors qu'on ne voit le soleil ou l'astre que par échappées très courtes, de n'avoir pas à chercher à le placer au milieu d'une étroite ouverture.

Pour être sûr que l'œil est bien dans le plan vertical qui contient l'image, on a ajouté une petite tige verticale noire qu'on peut installer sur l'alidade et qu'on doit projeter sur le point rouge. On est assuré qu'un relèvement est bon quand l'œil, cette tige, la pointe rouge et l'image de l'objet sont dans le prolongement les uns des autres.

Quand le soleil est assez brillant pour donner une ombre, le meilleur moyen d'obtenir un bon relèvement est de viser la division de la rose où se projette l'image de cette tige verticale. La division diamétralement opposée est évidemment le relèvement demandé.

Quand il s'agit d'une étoile, on projette son image sur les divisions éclairées de la rose, et, dans ce cas, pour que l'image soit visible, il faut avoir soin de baisser plus ou moins la mèche des lampes qui éclairent le compas. Lorsqu'on veut viser un phare ou un objet peu distinct à l'horizon, un récent perfectionnement de l'appareil permet de viser à l'objet directement, tandis qu'en se baissant, on voit les images des divisions de la rose réfléchies par le miroir. Sir W. Thomson est arrivé à ce résultat en disposant la monture de son miroir de façon qu'il puisse faire une révolution complète autour de son axe.

Vers 1884, sir W. Thomson a remplacé le miroir par un prisme à réflexion totale beaucoup plus facile à entretenir en bon état et qui rend plus aisés et meilleurs les relèvements de phares et d'objets terrestres.

CHAPITRE V

PRATIQUE DE LA COMPENSATION

Avant tout il faut se conformer aux règles données au commencement de la deuxième partie, et tout particulièrement à celle qui prescrit de ne jamais procéder à la compensation avant d'avoir détruit autant que possible l'influence nuisible du cap de construction ou d'armement dans le port. C'est dans l'oubli de cette prescription qu'il faut chercher l'explication de ces erreurs de 5 et 6°, parfois 8 et 10° pour les bâtiments neufs, tout en fer, qui se manifestent huit à dix jours après une compensation faite avec soin, d'ailleurs, mais sans avoir tenu compte de cette règle. Le mieux pour cela, c'est de laisser le bâtiment éviter le plus longtemps possible en rade, à tous les caps de la rose, sous l'influence du vent et de la marée, et de profiter de ses essais de machines, pour lui faire exécuter le plus grand nombre possible de tours d'horizon *alternatifs*, chacun d'eux étant décrit dans le sens opposé à celui du précédent. Il est également très utile de faire une première compensation approximative en rade ou pendant les essais de machines, avant de procéder à la compensation définitive.

On délivre avec chaque compas des paires de sphères compensatrices en fer doux et des barreaux aimantés de deux diamètres différents.

Le plus petit étant la moitié du plus grand, un petit aimant produit exactement ou a très peu près le quart de la déviation produite par un aimant de grand diamètre. Ces aimants sont colorés par moitié en bleu et en rouge. La partie rouge repousse le pôle

Nord de l'aiguille aimantée. Des logements pour ces aimants sont disposés dans l'habitacle du compas.

Dans les nouveaux modèles de compas, entre les logements des deux systèmes d'aimants se trouve une échelle verticale portant des nombres compris entre 9 et 20, soit m l'un d'eux, il indique que si on place à Glasgow, où la force horizontale est Hg, un gros barreau dans le logement unique ou transversal qui est en face de ce nombre, ce barreau produira sur la rose, si les aiguilles étaient perpendiculaires à la direction de la rose avant l'introduction du barreau, une déviation égale à $\frac{m^\circ}{2}$.

Deux gros barreaux placés dans les deux logements parallèles qui sont en face en m, donneraient aux aiguilles du compas primitivement perpendiculaires à la direction de ces logements une déviation de m°.

Dans un autre lieu où la force horizontale terrestre sera H, la déviation donnée par les deux gros barreaux longitudinaux sera égale à $m^\circ \times \frac{Hg}{H}$, et à bord d'un navire où la force moyenne vers le Nord est λ; ces deux mêmes barreaux, mis dans les logements marqués m, donneront une déviation (1) $m^\circ \frac{Hg}{\lambda H}$; or, Hg est à peu près égal à 0,900; et ce même nombre est égal à la valeur moyenne du coefficient λ pour les compas de relèvements bien placés; par conséquent dans le lieu donné à bord, la déviation produite par deux gros barreaux longitudinaux sera approximativement $\frac{m^\circ}{H}$ (2).

Un barreau de petit diamètre produit une déviation égale, approximativement, au quart de celle donnée par un gros barreau.

Connaissant ainsi dans un lieu donné l'effet très approximatif des barreaux, on pourra diminuer notablement les tâtonnements de la mise en place des barreaux. Il suffira, dans le lieu où on voudra rectifier la compensation rapidement, de faire sur un morceau de carton une nouvelle échelle graduée d'après la formule exacte ou la formule (2) quand celle-ci est suffisamment approchée. Quand on a observé une déviation donnée, et qu'on devra la faire varier d'un nombre de degrés donné, on saura de suite comment on doit déplacer les gros barreaux et comment il faut placer les petits pour parfaire la compensation.

(Voir *Déviations produites par les barreaux aimantés*, dans les notes à la fin de l'ouvrage.)

Il y a deux groupes de logements parallèles entre eux et un autre groupe de logements perpendiculaires à ceux-là.

On devra installer le compas de façon que les deux groupes de logements parallèles entre eux le soient aussi à la quille du navire. On emploie les aimants correspondants que nous appellerons aimants longitudinaux, *par paires*, dont chacun est placé dans les logements parallèles portant le même numéro; de cette manière ils ont sur la barre de Flinders une action symétrique dont la résultante est bien verticale. *Prendre un cap magnétique donné.* On doit placer les aimants correcteurs aux caps magnétiques exacts. En rade, on fait l'opération aisément aux coffres de régulation et au moyen d'aussières. A la mer par beau temps voici une règle pratique simple pour obtenir ce résultat.

A la mer, l'observation aidée du calcul ou les tables d'azimut donnent, pour une heure donnée, le relèvement vrai d'un astre; en vue de terre, la carte donne le relèvement vrai d'un objet terrestre éloigné. La carte donne, d'ailleurs, la valeur de la déclinaison, au lieu de l'observation, on a donc :

Relèvement magnétique = Relèvement vrai — Déclinaison.

En affectant les deux quantités du second membre des signes qui leur conviennent d'après les conventions indiquées, on obtient le relèvement magnétique en grandeur et en signe. Celui-ci obtenu, on évite toute chance d'erreur dans la mise au cap, en opérant ainsi :

1° Le bord de la glace supérieure de la cuve du compas doit être garni d'un cercle de cuivre divisé de 0 à 180° en allant de l'avant du navire à l'arrière, des deux bords. Si cette graduation n'existait pas, il serait d'ailleurs facile et peu coûteux d'en faire une sur cuivre, bois ou carton, par les moyens du bord.

2° On comptera tous les relèvements de 0 à 180° vers l'Est ou vers l'Ouest, en partant du pôle élevé au-dessus de l'horizon. Ils seront pris positivement dans l'Est et négativement dans l'Ouest.

3° On comptera le cap du navire, toujours positivement de 0 à 360°, en partant du Nord pour y retourner et passant d'abord par l'Est, puis par le Sud, enfin par l'Ouest.

Règle pratique pour prendre un cap magnétique donné. — Du relèvement magnétique pris avec son signe, retranchez le cap que vous voulez donner au navire; s'il y a lieu, ajoutez ou retranchez 360° au résultat, afin de le ramener à être plus petit que 180° en valeur absolue.

Fixez alors le bout de l'alidade de relèvement (qui se trouvera vers l'objet au moment de l'observation) sur la division du cercle de cuivre égale à la valeur numérique du résultat obtenu, à bâbord si le résultat est négatif, à tribord s'il est positif.

Faites alors abattre le navire jusqu'à ce que vous visiez l'objet ou l'astre avec l'alidade ainsi disposée.

Quand ce résultat est obtenu, vous êtes au cap voulu.

Exemples. — Le relèvement magnétique donné est N 120 E : on veut mettre le cap à l'Ouest magnétique.

La règle donne : 120 — 270 = — 150

On devra donc fixer l'extrémité de l'alidade, qui sera la plus proche de l'objet quand on le relèvera, sur la division 150 *bâbord* du cercle divisé.

2° On veut toujours mettre le cap du navire à l'Ouest magnétique, mais le relèvement magnétique donné est N 120 O.
La règle donne — 120 — 270 = — 390 ou — 30 en ajoutant 360.

Par conséquent, l'extrémité indiquée de l'alidade devra être fixée sur la division 30° *bâbord* du cercle divisé. On manœuvrera ensuite comme il est dit plus haut.

Principe de la méthode. — Au cap magnétique couru, ou pris, on met des aimants correcteurs ou on les déplace s'il y en a déjà, de façon que le compas indique précisément ce cap. On obtient le déplacement convenable du Nord de la rose en se rappelant que quand on présente, près de la rose, un quelconque des aimants correcteurs, placés comme nous l'avons dit plus haut, et orientés comme nous l'indiquons plus bas, le point Nord de la rose tend à s'éloigner de l'extrémité rouge de l'aimant pour se rapprocher de l'extrémité bleue. On note ensuite la position occupée alors par les aimants.

Quand il n'y a pas encore d'aimants en place, il ne peut jamais y avoir d'hésitation sur la direction et l'orientation de ceux qu'il convient d'employer, en appliquant les règles pratiques suivantes :

Règles pratiques. — Direction des aimants à employer. — A chaque cap cardinal magnétique, la direction des aimants à employer est celle de la perpendiculaire à la ligne Nord-Sud magnétique. L'observateur trouvera cette direction sans même avoir besoin de réfléchir, s'il s'habitue à toujours se placer sur la ligne Nord-Sud magnétique, de façon à avoir devant lui l'habitacle et le Nord magnétique.

On peut encore, si on le préfère, mettre la règle pratique sous la forme suivante :

Aux caps Nord et Sud magnétiques on emploie les aimants correcteurs perpendiculaires à la quille c'est-à-dire transversaux.

Aux caps Est et Ouest magnétiques on emploie les aimants correcteurs parallèles à la quille c'est-à-dire longitudinaux.

Orientation des aimants. — A un cap magnétique quelconque, la direction des aimants correcteurs ayant été obtenue par l'une des deux règles précédentes, ils doivent être orientés, de façon que leur extrémité rouge et le Nord du compas soient d'un même côté de l'observateur, alors que l'aimant n'agit pas encore sur l'aiguille qu'il doit ramener à lui être perpendiculaire.

Déplacement des aimants déjà en place. — Quand il faut déplacer les aimants pour que le cap au compas coïncide avec le cap magnétique, *approchez* les aimants correcteurs si leur extrémité rouge et le Nord du compas sont d'un même côté du Nord magnétique ou de l'observateur placé comme nous l'avons dit.

Au contraire, *éloignez* les aimants si leur extrémité rouge et le Nord du compas sont chacun d'un côté du Nord magnétique ou de l'observateur.

Supposons que nous partions du cap Nord magnétique et que nous fassions abattre le navire sur tribord.

COMPENSATION DE LA DÉVIATION SEMI-CIRCULAIRE PAR DES AIMANTS OU COMPENSATION PARTIELLE

Au cap Nord magnétique. — Placez un aimant transversal (l'extrémité rouge étant du bord où tombe le Nord du compas) dans le logement marqué sur l'échelle correspondante au lieu donné, du numéro égal au double de la déviation lue immédiatement sur la rose.

Vous rapprocherez cet aimant ou vous l'éloignerez, jusqu'à ce que le Nord du compas coïncide avec la ligne de foi, suivant que le Nord du compas restera du même bord ou passera de l'autre après la mise en place de l'aimant dans le logement indiqué.

Au cap Est magnétique. — Même opération qu'au cap Nord en se servant cette fois d'une paire d'aimants longitudinaux, orientés comme l'indique la règle pratique et placés primitivement dans les deux logements dont le numéro est égal à la déviation qu'avait le compas avant l'introduction des aimants. Vous rapprocherez ou vous éloignerez ensuite ces deux aimants d'une même quantité, suivant que le Nord du compas est resté, après l'introduction, du même côté de l'observateur placé comme nous l'avons dit plus haut, ou a changé de côté.

Au cap Sud magnétique. — Observez la déviation du compas, et déplacez les aimants transversaux de façon à réduire cette déviation de moitié.

Notez alors la déviation restante avec son signe ainsi que la place occupée par l'aimant.

Au cap Ouest magnétique. — Même opération qu'au cap Sud, mais opérée cette fois avec les aimants longitudinaux déplacés de la même quantité.

Notez la déviation restante et le logement occupé par les aimants. Ceci fait, la compensation de la déviation semi-circulaire ou ce que nous appelons dans ce livre la compensation partielle est terminée.

Compensation de la déviation quadrantale par les sphères. — Continuant à faire abattre le navire sur tribord mettez le cap au **Nord-Ouest** du compas. Observez et notez la déviation.

Après cette observation faites abattre le navire sur *bâbord,* c'est-à-dire en sens inverse de sa rotation primitive. Arrêtez-le successivement à chacun des caps cardinaux et quadrantaux DU COMPAS.

A chacun de ces caps principaux *du compas*, observez et notez la déviation correspondante, comme vous l'avez fait déjà au cap Nord-Ouest.

Ceci fait, appelant d_n, d_{ne}, d_e, etc., les déviations qui correspondent respectivement aux caps Nord, Nord-Est, Est, etc., du compas formez les quantités :

$$C = \frac{d_n - d_s}{2} \qquad D = \frac{d_{ne} + d_{so} - (d_{no} + d_{se})}{4}$$

$$B = \frac{d_e - d_o}{2} \qquad A = \frac{d_n + d_s + d_e + d_o}{4}$$

$$E = \frac{d_n + d_s - (d_e + d_o)}{4}$$

On obtient une valeur de A plus exacte, en général, en faisant la somme algébrique des huit déviations observées et en divisant cette somme par huit. Le calcul, toujours simple, est seulement un peu plus long.

1° Les aimants transversaux sont d'autant plus correctement placés que C a une valeur absolue plus faible.

2° Les aimants longitudinaux sont d'autant plus exactement placés que B a une valeur absolue plus faible.

Plus loin (p. 228) nous dirons comment on peut, au moyen de ces deux valeurs, si elles sont plus grandes que 1°30′ en valeur absolue, les réduire à moins de un degré.

3° La valeur de D indique la position qu'on doit donner aux sphères compensatrices (V. page 234).

Si D est positif, et c'est le cas général, la ligne des centres des deux sphères devra être orientée perpendiculairement à la quille.

Si D est négatif, et c'est le cas exceptionnel, la ligne des centres des deux sphères devra être orientée parallèlement à la quille.

Pour trouver la distance commune à laquelle le point le plus voisin de chacune des sphères doit se trouver du centre de compas, on prend dans la première colonne verticale de la table p. 234. le nombre de degrés et minutes égal à D, et on suit la ligne horizontale qui correspond à ce chiffre, jusqu'à ce que l'on soit arrivé au nombre qui se trouve dans la colonne verticale portant en tête le diamètre des sphères avec lequel on doit corriger, ce dernier nombre indique la distance à laquelle on doit placer les sphères.

Quand on a plusieurs paires de sphères de diamètres différents à sa disposition, il convient de choisir celles qui corrigent le D trouvé, quand chacune d'elles est à peu près à moitié de l'excursion qu'elle peut faire dans ses guides.

4° Si la valeur de A dépasse 1°30′ en valeur absolue, il faut vérifier avec soin le repérage de la ligne de foi, et le rectifier s'il y a lieu et tenir lieu de cette rectification pour les déviations trouvées antérieurement.

5° Si la valeur trouvée pour E est inférieure à 1°30′ en valeur absolue on n'en tient pas compte pour la mise en place des sphères. Mais quand les déterminations successives et répétées de ce coefficient au moyen d'observations très exactes ont montré qu'il avait une valeur absolue supérieure à cette quantité, il convient de faire varier la distance et l'orientation de la ligne des centres des sphères, comme nous l'indiquerons tout à l'heure. On se trouve alors dans un des cas très exceptionnels de la compensation. Ces cas se présentent soit, quand l'axe du compas étant dans le plan longitudinal du navire, les masses de fer situées de chaque bord (telles que canons, tourelles, canots en fer) ne sont pas symétriques et sensiblement égales, soit encore, quand ces masses de fer réunissant ces deux conditions, l'axe du compas ne peut être placé dans le plan longitudinal du navire, ce qui rend prépondérante, sur le compas, l'action des masses de fer situées du bord dont il est le plus rapproché.

EXEMPLE NUMÉRIQUE D'UNE COMPENSATION COMPLÈTE

Après avoir placé les aimants correcteurs, on a fait un tour d'horizon, en calculant la déviation correspondante à chacun des huit caps principaux du compas; on a trouvé ainsi :

$d_n = 0$
$d_{ne} = +1°45'$
$d_o = -1°30'$
$d_{se} = -4°45'$
$d_s = -3°$
$d_{so} = -1°45'$
$d_e = -3°30'$
$d_{no} = -4°$

De ces déviations, on tire au moyen des formules précédentes

$C = +1°30'$ $\quad D = +2°$ $\quad A = -2°$
$B = -1°$ $\quad E = +0°30$

Par conséquent les aimants longitudinaux et même les aimants transversaux sont placés d'une façon suffisamment correcte.

La valeur de D indique (voir page) que, si l'on emploie des sphères de 216^{mm}, on doit placer chacune d'elles à 367^{mm} du centre des compas et orienter la ligne des centres perpendiculairement à la quille.

Rectification de la position des aimants au moyen du calcul des coefficients.

Supposons que le calcul des coefficients, opéré comme il vient d'être dit, nous ait donné, *dans un autre cas*,

$$\begin{array}{lll} C = -4° & D = +2° & A = -2° \\ B = -2°30' & & E = +1° \end{array} \quad (2)$$

On place les sphères d'après la valeur trouvée pour D.

Puis, si on a du temps devant soi, on profite des circonstances favorables pour rectifier la position des aimants correcteurs et annuler ainsi, ou à très peu près, les valeurs trop considérables de B et C qui montrent que les aimants ne sont pas placés aussi correctement qu'il le faudrait.

Il suffit pour cela que le navire puisse être mis et gardé quatre ou cinq minutes sur deux caps cardinaux quelconques, mais adjacents du compas. On opère alors ainsi :

Au cap Nord ou Sud du compas. — Observez la déviation, soit d, sa valeur, prise avec son signe, c'est-à-dire que d représente un nombre positif ou négatif suivant le cas. Formez la quantité $d-(A+E)=p$.

Les angles A et E se comptent, comme la déviation, à partir du Nord magnétique, et avec les mêmes conventions, c'est-à-dire à droite de cette direction s'ils sont positifs, à gauche s'ils sont négatifs.

Il y a deux cas à distinguer, suivant que cette différence est positive et égale à $+p$; ou négative et égale à $-p$, en mettant le signe de p en évidence, de façon que la lettre p, elle-même, représente toujours, dans ce qui suit, la différence en question prise positivement.

1^er^ Cas. $d-(A+E)>0$ ou $=+p$. Il faudra, pendant que le bâtiment garde aussi exactement que possible le même cap, déplacer l'aimant transversal de façon que le compas indique le cap NpE. ou SpO, suivant que le cap primitif était le Nord ou le Sud.

2^me^ Cas. $d-(A+E)<0$ ou $=-p$.

Déplacez l'aimant transversal de façon que le cap indiqué par le compas, soit NpO. ou SpE, suivant que le cap primitif était le Nord ou le Sud.

Au cap Est ou Ouest du compas. — Observez la déviation avec son signe soit d.

Formez la quantité $d-(A-E)$.

Il y a deux cas à distinguer suivant que cette différence est positive et égale à $+p$, ou bien négative et égale à $-p$.

$$1^\circ \quad d-(A-E)>0 \text{ ou } =+p.$$

Déplacez les aimants longitudinaux de façon que, le navire gardant invariablement le même cap, le compas indique

$$S\,(90-p)\,E \text{ ou } N\,(90-p)\,O$$

suivant que le cap primitif était l'Est ou l'Ouest.

$$2^\circ \quad d-(A-E)<0 \text{ ou } =-p.$$

Déplacez les aimants longitudinaux de façon que, le navire gardant invariablement le même cap, le compas indique

$$N\,(90-p)\,E \text{ ou } S\,(90-p)\,O$$

suivant que le cap primitif était l'Est ou l'Ouest.

Exemple numérique. — Dans le cas qui nous occupe (2) :

Au cap Nord du compas. — On observe d, soit — 5°; on forme, $d - (A + E) = -4°$. On déplacera l'aimant transversal jusqu'à ce que le cap indiqué par le compas soit N 4 O.

Au cap Est du Compas. — On observe $d = -5° 30'$; on forme $d - (A - E) = -2° 30'$; on déplacera les aimants longitudinaux jusqu'à ce que le compas indique le cap N $(90 - 2° 30')$ E c'est-à-dire N 87° 30′ E.

Ceci fait, on peut compter que B et C sont très près d'être nuls.

Vérification des opérations. — Après le déplacement de chaque système d'aimants, la rose n'indique plus un cap cardinal du compas, remettez le navire au cap cardinal de la rose qu'il avait avant le déplacement des aimants et assurez-vous alors qu'aux caps Nord ou Sud la déviation du compas est égale à $A + E$, tandis qu'aux caps Est ou Ouest la déviation est égale à $A - E$. Avec les erreurs inévitables d'observations à bord, on ne tient pas compte des différences qui ne dépassent pas 30 minutes en valeur absolue. On ne doit rectifier les aimants au moyen des valeurs de A et de E que lorsqu'on est bien assuré de l'exactitude des observations qui ont donné ces valeurs.

Remarque pour les navires neufs. — Quand un navire est neuf, ou nouvellement armé après une période de repos et de grands remaniements dans un port, nous pensons qu'il faut toujours opérer comme nous l'avons indiqué pour être assuré de l'exactitude de la position des sphères et avoir des renseignements suffisamment approximatifs sur l'exactitude avec laquelle la compensation a été effectuée. Même en agissant ainsi, et surtout à bord des bâtiments complètement en fer, il sera bon, si on a eu occasion de faire la compensation plus de huit jours avant le départ, de la vérifier et de la rectifier, soit deux ou trois jours auparavant, soit même, aussitôt qu'on sera en route libre par beau temps, en faisant un tour d'horizon. Il ne sera pas rare qu'on constate alors qu'il faut déplacer les aimants et même les sphères de fer doux. Mais plus le bâtiment naviguera et plus les déplacements à donner aux sphères seront faibles; au bout d'un temps variable de navigation qui ne sera guère inférieur à six mois, on trouvera, dans les vérifications successives, que la place des sphères ne doit pas être modifiée. Quand trois déterminations successives auront donné ce résultat, on pourra considérer les sphères comme définitivement fixées pour tous les points du globe et tant que la quantité ou la disposition des masses de fer avoisinant le compas ne seront pas changées.

Rectification de la position des sphères. — Supposons que dans la première compensation effectuée à bord d'un navire neuf, on ait dû placer les sphères de 216 ^{mm} à 222 ^{mm} du compas, pour corriger un D égal à $+ 6°$

Quelque temps après on contrôle la compensation. Pour cela on court d'abord successivement aux quatre caps cardinaux magnétiques, et on modifie convenablement, s'il y a lieu, la position des aimants correcteurs. Ensuite, sans toucher aux sphères, on fait exécuter au navire un tour complet d'horizon, en l'arrêtant successivement sur chacun des huit caps principaux du compas, et en observant à chaque cap la déviation correspondante.

On forme la nouvelle valeur de D d'après la formule donnée plus haut et on trouve $D' = -1°30'$. — On fait la somme algébrique $D + D' = +4°\ 30'$.

Les sphères du diamètre donné devront être éloignées jusqu'à la distance de 255 ^{mm} qui convient à cette nouvelle valeur de D qu'on obtient, comme on le voit, en additionnant la valeur de D correspondante à la position des sphères qu'on veut rectifier, et la valeur de D' qu'elles laissaient subsister dans cette position.

MISE EN PLACE DES SPHÈRES SANS CALCUL

Quand les deux systèmes d'aimants correcteurs ont été mis en place en courant successivement aux quatre caps cardinaux et, dans la très grande majorité des navires (où D est positif pour les compas bien placés, c'est-à-dire où, après avoir mis en place les aimants, en courant aux quatre caps cardinaux magnétiques, on observe ensuite une déviation positive aux caps quadrantaux, N-E, S-O, et une déviation négative aux caps quadrantaux N-O, S-E), on peut disposer les sphères, d'une façon suffisamment exacte, sans faire aucun calcul.

Pour cela, il suffit de mettre le bâtiment successivement à chacun des caps quadrantaux du compas, et à chacun de ces caps de disposer les sphères, la ligne des centres perpendiculaire à la quille, de façon à annuler la déviation. On note à chaque cap et quand ce résultat est obtenu, la distance du point le plus voisin de chaque sphère au centre du compas, et on fixe définitivement les sphères à la distance moyenne de ces quatre distances, c'est-à-dire à la distance égale au quart de leur somme.

Ceci fait, on profite des évitages du bâtiment sur rade, sous l'influence du vent ou de la marée, pour recueillir les éléments d'une courbe ou d'une table complète de déviation. Mais comme, en général, après les opérations précédentes, la déviation ne dépasse pas trois dégrés en valeur absolue à aucun cap, on voit qu'on peut naviguer correctement avec les indications du compas, même lorsqu'on n'a pas eu le temps d'obtenir la table ou la courbe.

Nouvelle simplification de la mise en place des sphères. — Quand un bâtiment a déjà navigué quelque temps, et que l'observateur, connaissant bien son compas et déjà familier avec les opérations de la compensation, a placé les aimants au moyen d'observations aux quatre caps cardinaux magnétiques, il peut, si le temps presse, mettre les sphères en place en se bornant à annuler avec elles la déviation à deux caps quadrantaux adjacents et en les fixant ensuite à la distance moyenne des deux distances trouvées.

Si les opérations ont été faites exactement, la déviation d'un compas, ainsi compensé, ne dépassera guère quatre degrés à aucun cap.

A la rigueur, dans les mêmes conditions, c'est-à-dire quand on sait que D est positif, par la comparaison avec d'autres bateaux de types semblables, ayant un compas semblablement placé, on peut, si le temps presse, mettre les sphères en place en se bornant à courir à un seul cap quadrantal quelconque, et à annuler la déviation observée avec les sphères.

On fait ensuite, à loisir, les observations nécessaires à l'établissement de la courbe et de la table qui permettent de placer les sphères exactement (V. p. haut).

CAS EXCEPTIONNEL DE LA COMPENSATION

E a une valeur plus grande que 2°.

Dans ce cas on forme la quantité $\sqrt{D^2+E^2}$ — On obtient ainsi un nombre de degrés et dixièmes de degrés, on convertit ces derniers en minutes. C'est avec le nombre de degrés et minutes ainsi calculé qu'on rentre dans la table (p. 233) pour trouver, comme tout-à-l'heure avec D, la distance à laquelle il faut placer les sphères.

On forme ensuite la quantité $\text{tang.}\, 2\text{m} = \frac{E}{D}$

La table des lignes trigonométriques naturelles, donnée à la fin du volume, permet de trouver immédiatement l'angle 2m dont la tangente a la valeur donnée par cette formule.

On compte l'angle 2m autour du centre du compas, de 0 à 90°, à partir de la portion de la perpendiculaire à la quille qui va vers tribord, positivement vers l'arrière, négativement vers l'avant.

Quelle que soit la valeur de $\frac{E}{D}$ il y a toujours un angle, positif ou négatif, plus petit que 90° en valeur absolue, qui répond à cette valeur, soit 2m. A la moitié de cet angle, soit m, correspond une droite, prolongeons-la au delà du centre du compas et considérons cette droite et la perpendiculaire à cette droite. C'est suivant une de ces deux directions que devra être orientée la ligne des centres des sphères. On choisit l'une ou l'autre suivant le signe de D.

Si D est positif, on prendra celle des deux droites qui donne la direction la plus rapprochée de la perpendiculaire à la quille.

Si D est négatif on prend, au contraire, la droite qui donne la direction la plus rapprochée de la quille.

Exemple numérique. — On a trouvé D = + 7° 30′ E = — 4° On a, pour corriger des sphères de 254^{mm} de diamètre.

$$\sqrt{D^2 + E^2} = \sqrt{68.5} = 8.27 = 8°\,15'$$

Donc il faut placer les sphères données à 223^{mm} du centre.

$$\frac{E}{D} = \frac{-4}{+7.5} = -0.53 ;\ 2\,m = -28° ;\ m = -14° ;\ m + 90° = 76°$$

D étant positif, on doit choisir parmi les deux valeurs, m et m + 90°, celle qui donne la direction la plus rapprochée de la perpendiculaire à la quille, soit m = — 14°.

Donc, la ligne des centres devra faire avec la portion indiquée de la perpendiculaire à la quille et vers l'avant un angle de 14°, c'est-à-dire que c'est la sphère de tribord qui sera sur l'avant.

Rectification de la position et de l'orientation des sphères. — Supposons que dans une première compensation on ait placé les sphères comme il vient d'être dit, afin de corriger, un D = + 7°30′ et un E = — 4°.

Au bout de quelque temps, dans un autre lieu ou dans le même, on contrôle cette compensation. Pour cela, on court d'abord successivement aux quatre caps cardinaux magnétiques, et on modifie convenablement, s'il y a lieu, la position des aimants correcteurs. Ensuite, sans toucher aux sphères, on fait exécuter au navire un tour complet d'horizon, en l'arrêtant successivement sur chacun des huit caps principaux du compas, et en observant à chaque cap la déviation correspondante.

On forme les nouvelles valeurs de D et E, soit D′ et E′, d'après les formules de la page 226.

On trouve ainsi $D' = -1^\circ 30'$ $E' = +1^\circ 30'$

On forme la quantité $\sqrt{D^2 + D'^2 + E^2 + E'^2}$, on la calcule et on la réduit en degrés et minutes. Elle donne au moyen de la table, p. 233, la nouvelle distance à laquelle on doit placer les sphères.

L'orientation de la ligne des centres est donnée par la formule

$$\operatorname{tang} 2m = \frac{E + E'}{D + D'} = \frac{-2^\circ 30'}{+\ 6^\circ} = -\frac{2,5}{6} = -0,416$$

$$2m = -22^\circ 30' ;\ m = -11^\circ 15 ;\ 90^\circ + m = 79^\circ 45$$

La valeur nouvelle de D, soit $D + D'$. est positive, donc on doit choisir, parmi les deux valeurs m et $90 + m$, celle qui donne la direction la plus rapprochée de la perpendiculaire à la quille, soit $m = -11^\circ 15'$

La ligne des centres devra faire, dans ce cas, avec la portion indiquée de la perpendiculaire à la quille un angle de 11° 15′ la boule de tribord sera sur l'avant.

Toutes les fois qu'on a réduit, par la compensation, les coefficients variables B, C, D, à ne pas dépasser 30′ en valeur absolue, on peut considérer la compensation comme excellente. Si chacun de ces coefficients ne dépasse pas 1° en valeur absolue, la compensation est très bonne, et il ne faut y toucher qu'avec les plus grandes précautions et dans des circonstances tout à fait favorables à l'exactitude des observations. Ce n'est, pour ainsi dire, que par un hasard exceptionnellement heureux ou des rectifications successives, toutes bien faites, qu'on arrive à annuler l'un des coefficients ou à lui donner une valeur insensible à l'observation.

Un compas dont toutes les déviations seraient comprises entre + 1° et — 1° est un compas exceptionnellement bien compensé. Si la déviation ne dépasse jamais 2° en valeur absolue, la compensation est très satisfaisante. En général, on peut se contenter d'avoir amené la déviation à ne jamais dépasser 3° à aucun cap [1].

Après avoir ainsi opéré la compensation horizontale, on passe à la

Compensation pour la bande.

Il y a lieu de distinguer les cas suivants :

Premier cas. — On n'a pas à bord d'aiguille d'inclinaison qui permette d'obtenir la valeur de μ (V. p. 187) et de la faire varier au moyen d'aimants correcteurs de façon à annuler le coefficient J (V. p. 201).

Deuxième cas. — On a une aiguille d'inclinaison de sir W. Thomson, c'est-à-dire une aiguille aimantée dont on se sert en la rendant horizontale quand elle est orientée dans le méridien magnétique.

Troisième cas. — On a une aiguille d'inclinaison, mais au lieu de s'orienter dans le plan Nord-Sud magnétique, on la place dans le plan Est-Ouest, où elle se tient verticale, et on observe le nombre des oscillations qu'elle fait, dans ce plan, dans un temps donné.

Premier cas. — *On n'a pas d'aiguille d'inclinaison à bord.*

La compensation ne peut s'effectuer empiriquement que s'il est possible de faire donner aisément 7 ou 8° et mieux 10° de bande au bâtiment, soit en rade soit en mer calme, de façon que la bande du navire reste constante au degré près, et le compas stable durant toutes les observations.

Ceci posé, mettez le navire, ainsi mis à la bande, au cap Nord ou Sud du compas.

Prenons Nord pour fixer les idées. Observez la déviation correspondante, concluez-en le cap magnétique exact, soit N7E.

Dans le tableau des déviations dressé pour le compas, dans le lieu donné quand le navire est droit, cherchez le cap au compas qui correspond à N7E, soit N10O.

On place alors dans la gaine verticale et cylindrique de cuivre, qui se trouve sur la verticale du centre du compas, et alors qu'elle se trouve au plus bas de sa course, un aimant vertical qu'on oriente de manière à ce que quand on l'élève, le cap lu au compas s'écarte de plus en plus du Nord pour aller vers l'Ouest. On arrête et on fixe la gaine dans la position qu'elle occupe au moment où le compas, sous l'influence de l'aimant correcteur, marque bien le cap N10O.

1. Quand on a orienté les sphères pour corriger un E notable, il faut déterminer à nouveau la valeur de A.

Si un aimant ne suffit pas pour atteindre ce résultat quand la gaine est au plus haut de sa course, on la fait retomber à son point le plus bas, et on introduit un autre aimant vertical orienté comme le premier, on élève la gaine et ainsi de suite jusqu'à ce que le compas marque le N10O.

Les aimants étant ainsi placés, on met le navire au nouveau cap Nord du compas ainsi corrigé et on s'assure que la déviation à ce cap, le navire étant toujours à la bande, a bien la valeur qu'elle aurait à ce même cap du compas, si le bâtiment était droit.

Dans la grande majorité des cas il en est ainsi; dans des cas très exceptionnels, ceux où le coefficient J a de grandes valeurs, on trouve une légère différence et on l'annule en modifiant convenablement la distance des aimants à la rose. On met le navire au nouveau cap Nord ou Sud du compas et on vérifie que le résultat cherché a été obtenu.

Vérification de la compensation pour la bande. — Quand il y a de fortes pièces de fer verticales près du compas, il convient de s'assurer qu'aux caps Est et Ouest où elles ont la plus grande influence, elles ne troublent pas l'efficacité de la compensation ainsi faite d'une façon dangereuse. On mettra donc le navire toujours à la bande à l'un de ces deux caps, soit l'Est du compas et l'on observera la déviation. Si elle diffère de la valeur qu'elle a, à ce cap du compas le navire droit, soit $A + E$, de plus de 1° on notera la différence, on la divisera par le nombre de degrés de bande du navire et on aura ainsi la valeur très approximative du coefficient $\frac{c}{\lambda}$ de la formule 24 de la page 86, dont il faudra tenir compte dans le calcul de δi toutes les fois que la route sera voisine de l'Est ou l'Ouest du compas.

Ce que nous venons de dire s'applique évidemment aux compas ordinaires non compensés, ou partiellement compensés, dans lesquels on veut corriger l'erreur due à la bande, aussi bien pour cette erreur elle-même que pour rendre le compas plus stable quand le navire roule.

Deuxième cas. — *On a une aiguille d'inclinaison de sir W. Thomson* (V. pages 39 et 40).

Pour se servir de cette aiguille, on doit la mettre dans le méridien magnétique et la ramener à l'horizontalité dont elle est écartée, à terre par la force magnétique terrestre, à bord par l'ensemble des forces magnétiques de la terre et du navire. A cet effet, à terre, dans l'hémisphère Nord magnétique, on met sur l'extrémité de l'aiguille qui pointe vers le Sud un contrepoids en papier ou en carton mince qu'on voit figuré ici au-dessous de *a a*. On fait glisser ce contrepoids le long de l'aiguille jusqu'à ce qu'elle soit horizontale. On mesure alors la distance du centre du contrepoids à l'axe *a a*, au moyen de l'échelle inclinée qu'on voit en *c*.

Pour que l'observation soit exacte, il faut que l'axe *a a* soit horizontal ou à très peu près au moment de l'observation. Cette condition est remplie quand la bulle d'air contenue dans le petit niveau *n* est au milieu de ce niveau. On arrive, avec quelques minutes d'exercice, à réaliser cette condition en tenant simplement l'instrument à la main.

Le plateau *p* est élevé ou abaissé suivant qu'on veut soutenir l'aiguille au repos ou la rendre mobile pour l'observation.

Ce cas se subdivise lui-même en deux autres, suivant qu'on a compensé ou non la déviation quadrantale sur le compas dont on s'occupe.

1° *On a fait une compensation horizontale complète.* — C'est le cas du compas de sir William Thomson. Alors $\mathfrak{D}$ est nul et la formule 25 de la page 86 montre que J sera nul quand, au moyen d'aimants correcteurs, on aura rendu $\mu = \lambda$. Il faut donc avoir la valeur de λ.

A un cap quelconque du compas, une seule observation d'écart de la rose avec le déflecteur (V. Cinquième partie), ou si on n'a pas de déflectéur, une simple observation d'oscillation de la rose donne la valeur de λ.

Observations préliminaires à terre. — *a*. Le compas étant mis dans un lieu libre de fer on fait avec le déflecteur l'observation d'écart (V. 5e partie), ou quand on n'a pas de déflecteur on fait l'observation d'oscillation qui, jointe à une observation correspondante à bord, permettra d'avoir la valeur de λ.

b. Dans le même lieu, on oriente l'aiguille d'inclinaison dans le méridien magnétique, la pointe inférieure tournée vers le Nord.

Une erreur de 4 ou 5 degrés commise sur la direction du méridien magnétique ne donnerait pas une erreur sensible. On met alors le contrepoids de papier à une distance de l'axe de rotation, telle que l'aiguille devienne horizontale. On mesure au moyen de l'échelle la distance *a* à laquelle il se trouve alors de l'axe de rotation.

Observations à bord. — A bord, à un cap quelconque, une observation d'écart avec le déflecteur, ou d'oscillation, si on n'a pas cet instrument, donnera la seconde quantité nécessaire pour avoir λ.

Quand pour une raison quelconque on n'a pas pu faire les observations nécessaires à la détermination de sa valeur exacte, on peut le prendre égal à 0,900 pour un compas de relèvements placé dans l'axe du bâtiment et suivant les prescriptions que nous avons indiquées. Dans les ports de France une erreur de quatre à cinq pour cent sur cette évaluation ne donne guère lieu qu'à un degré et demi d'erreur pour 10 degrés de bande.

On déplace le contrepoids en papier porté par l'aiguille d'inclinaison et on le met à une distance de l'axe $b = \lambda a$.

C'est-à-dire que si $a = 1,9$ sur l'échelle divisée, que λ soit égal à 0,9 on devra mettre le contrepoids à la distance $b = 1,8$.

Ceci est fondé sur les équations très simples de la page 40.

On met le navire au cap Est ou Ouest magnétique, c'est-à-dire puisque le compas a été entièrement compensé au cap Est ou Ouest du compas. Si on est à la mer, on gouverne aussi droit que possible au moyen d'un compas auxiliaire placé à $2^{m},50$. On enlève la cuve et la rose du compas à compenser et on les éloigne d'un mètre cinquante au moins.

On met alors l'aiguille d'inclinaison aussi exactement que possible à l'emplacement occupé tout à l'heure par les aiguilles de la rose, son centre est alors sur l'axe vertical du compas, sa longueur perpendiculaire à la quille, le contrepoids de papier vers le Sud.

Quand l'aiguille d'inclinaison est au repos, la bulle du niveau étant au milieu de sa glace, on observe la position qu'elle occupe.

Si l'aiguille est horizontale, cela veut dire que, dans le lieu où l'on se trouve, il n'y a pas d'erreur due à la bande à compenser.

Si elle n'est pas horizontale, et c'est le cas général, on la ramène à cette horizontalité, en plaçant, dans la gaine cylindrique verticale qui se trouve au centre de l'habitacle, un aimant vertical convenablement orienté. Cette gaine, au début de l'opération, doit être aussi loin que possible de la rose.

Règle pratique pour l'hémisphère Nord magnétique. — Si, à bord, le poids additionnel en papier est en haut, il faut mettre l'aimant vertical le pôle rouge en haut.

Si, à bord, le poids additionnel est en bas, on devra mettre l'aimant vertical, le pôle rouge en bas.

Dans l'hémisphère Sud magnétique, il faudrait mettre les pôles d'une façon précisément inverse puisque le contrepoids a été mis à terre sur l'extrémité de l'aiguille qui pointe vers le Nord.

Ceci fait, on élève doucement la gaine vers la rose jusqu'à ce que l'aiguille toujours orientée et lestée, comme nous l'avons dit, devienne horizontale.

Quand ce résultat est obtenu, on fixe la gaine dans la position qu'elle occupe alors.

Si un aimant vertical ne suffit pas, on ramène la gaine en bas de son logement, on introduit un second aimant, puis on relève la gaine petit à petit et on la fixe dans la position qu'elle occupe quand l'aiguille est horizontale.

Deuxième cas. 2° — *Il s'agit d'un compas ordinaire dans lequel la déviation quadrantale n'a pas été corrigée.*

Alors il faut avoir les valeurs de λ et de $\mathfrak{D}$. Ceci fait on calcule la quantité $\lambda (1 - \mathfrak{D})$. Le bras de levier du contrepoids qui rend l'aiguille horizontale à terre étant a, devra être à bord $a \times \lambda (1 - \mathfrak{D})$, au lieu d'être $a\lambda$ comme tout à l'heure.

Troisième cas. — *On a une aiguille d'inclinaison ordinaire* qu'on observe quand elle oscille sur le plan Est-Ouest magnétique.

Ce cas se subdivise encore en deux autres, suivant que la déviation quadrantale a été ou non corrigée.

1° La déviation quadrantale a été corrigée.

Dans ce cas, $\mathfrak{D} = 0$, et pour que J soit nul il faut rendre μ égal à λ.

On doit donc avoir obtenu la valeur de λ : ceci posé en appelant T le temps de 10 oscillations de l'aiguille verticale dans le plan Est-Ouest magnétique; on devra, à bord du navire dont le cap sera mis à l'Est ou à l'Ouest magnétiques, disposer des aimants verticaux de façon que le temps T′ de 10 oscillations soit tel que

$$\lambda T'^2 = T^2 \text{ ou } T' = \frac{T}{\sqrt{\lambda}}$$

Si $\lambda = 0{,}900$ sa valeur ordinaire pour les compas de relèvements, on devra avoir $T' = T \times \frac{1}{0{,}95}$.

2° La déviation quadrantale n'a pas été corrigée, c'est-à-dire qu'on s'occupe d'un compas non compensé ou partiellement compensé seulement.

Alors pour que J soit nul, il faut que μ soit égal non plus à λ comme dans le cas où la déviation quadrantale a été corrigée, mais bien à $\lambda(1-\mathfrak{D})$, il faudra donc disposer les aimants correcteurs verticaux de façon à ce que le temps T′ de 10 oscillations à bord soit au temps T de 10 oscillations à terre, dans le rapport de 1 à $\sqrt{\lambda(1-\mathfrak{D})}$.

Règle pratique. — En général, les deux quantités λ et $\lambda(1-\mathfrak{D})$ sont plus petites que l'unité et il en résulte que T′ doit être plus grand que T.

Pour augmenter la durée d'oscillation, il faut diminuer la force directrice de l'aiguille; par conséquent, à bord il faudra mettre l'aimant vertical de façon à ce que le pôle supérieur soit de même nom que le pôle inférieur de l'aiguille d'inclinaison.

Quand on voudra au contraire que T′ soit plus petit que T, le pôle supérieur de l'aimant correcteur devra être de nom contraire au pôle inférieur de l'aiguille d'inclinaison.

Il est donc bon de marquer de bleu et de rouge les deux extrémités de l'aiguille d'inclinaison. Il faut d'ailleurs bien faire attention qu'à bord et à terre ce soit toujours le même pôle de l'aiguille d'inclinaison qui soit en bas.

Cette méthode est beaucoup plus longue et plus délicate à pratiquer que celle imaginée par sir William Thomson.

Nous n'aurions donc exposé que cette dernière, si nous n'attachions pas une grande importance à la correction de l'erreur due à la bande. Nous avons pensé qu'il fallait prévoir tous les cas possibles, et notamment celui où l'on aurait à sa disposition une aiguille pouvant rendre la position verticale. Mais dans ce cas, il serait de beaucoup préférable de faire à cette aiguille un cadre tel qu'on puisse observer son horizontalité même seulement à 2 ou 3° près et d'appliquer alors la deuxième méthode.

Remarques. — I. Les aimants devront être fixés de façon à ce que les mouvements de roulis et de tangage ne puissent faire varier leur distance ni leur position par rapport à la rose.

II. Le coefficient μ provient de l'influence du magnétisme sous-permanent vertical R et du fer doux vertical k; or, l'aimantation de cette dernière tige change avec la valeur de la composante verticale magnétique terrestre, et nous avons compensé le terme en μ au moyen d'un aimant permanent, c'est-à-dire d'une force constante, il en résulte que la correction ne sera exacte que pour le lieu où elle a été faite. Il faudra donc changer l'aimant vertical de place quand le navire se déplacera. Si l'on avait à sa disposition une bonne carte des valeurs de Z [ou, ce qui revient au même, deux cartes donnant l'une les valeurs de la composante horizontale, l'autre les valeurs de l'inclinaison ou de la force totale terrestre], on pourrait, une fois l'observation faite à terre avant le départ, corriger la position de l'aimant à bord dans une latitude quelconque, sans mettre le navire à la bande, pourvu que le bâtiment fût tranquille, car on saurait au moyen de la carte la position que le poids additionnel devrait occuper sur l'aiguille d'inclinaison pour qu'elle restât horizontale, en n'étant soumise qu'à l'action magnétique terrestre.

III. Nous avons dit qu'il fallait, pour corriger l'erreur due à la bande, mettre le cap du navire à l'Est ou à l'Ouest magnétiques. C'est bien en effet la condition d'exactitude rigoureuse qu'impose l'expression de $\frac{Z'}{Z}$ en fonction de g et de μ (form. 59). Mais, si on considère que g atteint rarement $\frac{1}{10}$ en valeur absolue, on voit que le produit $g \cos \zeta$ peut être négligé, tant que le cap n'est pas distant de l'Est et de l'Ouest magnétiques de plus de 30 degrés, et par suite, qu'on peut faire les observations nécessaires à la correction de l'erreur due à la bande, à un cap quelconque du navire, pourvu qu'il soit compris entre les limites précédentes.

IV. La correction de la déviation quadrantale a une heureuse influence sur l'erreur due à la bande. La théorie montre, en effet, que pour chaque degré de déviation quadrantale corrigée, on a en même temps corrigé, par cela seul, un nombre de minutes de l'erreur due à la bande qui, sur les côtes Nord de la France, est égal à $2,1 \times \operatorname{tang} \theta$, soit plus de cinq minutes. Si donc, comme c'est le cas général, on a corrigé 6 degrés de déviation quadrantale, on a fait disparaître en même temps 30 minutes de l'erreur due à la bande (V. notes).

CONCLUSION

C'est à ces deux sortes d'opérations, compensation horizontale et compensation de l'erreur de bande, que se bornent les opérations qu'on peut faire au port de départ. La mise en place de la barre de Flinders nécessite des observations dans deux lieux différents du globe, sauf dans les cas exceptionnels où les faits observés sur plusieurs bateaux de même type ont appris que, pour les compas semblablement placés, les coefficients avaient des valeurs à très peu près égales ou bien encore quand on traverse l'équateur magnétique.

La compensation consiste à transformer le champ magnétique variable où se meut l'aiguille, en un champ magnétique uniforme dont l'intensité soit λ H. Chaque compensateur en altérant la force directrice à un cap donné modifie par conséquent la déviation imprimée à l'aiguille par les correcteurs mis précédemment. Une compensation exacte ne peut donc s'obtenir que par des approximations successives. C'est pour cela qu'il est si essentiel de faire une première compensation approximative dans le port ou en rade. De la sorte, dans la très grande majorité des cas, il suffit d'un seul tour d'horizon pour que la valeur absolue de la déviation ne dépasse jamais 3° à aucun cap.

Pour faire cette compensation approximative, il suffirait d'obtenir des valeurs approchées B′C′D′ de B, C, D, par trois observations de déviation faites aux trois caps principaux d'un quadrant, formules 35, pages 140 et 141, en négligeant A et E. On mettrait alors les aimants compensateurs et les sphères en place. Avec des aussières, on mettrait le navire aux caps Est ou Ouest magnétiques à 10° près; alors avec une valeur de λ, soit obtenue par l'observation directe, soit estimée *à priori*, par l'examen des valeurs de ce coefficient sur des bâtiments semblables et pour des compas semblablement placés, on corrigerait l'erreur due à la bande avec des aimants verticaux; de cette façon on n'aurait plus qu'à rectifier cette compensation quelques jours après et on aurait un résultat beaucoup meilleur.

Ceci suppose bien entendu d'abord que les observations dans le port peuvent être faites assez loin de tout amas considérable de fer, dépôts des chaînes, ancres, ou canons, ou postes de bâtiments cuirassés ou tout en fer, ensuite que tout le matériel est à bord et à poste.

Si ces observations ne pouvaient être faites dans le port, il faudrait les faire dès les premiers temps du séjour en rade, de façon à ce qu'il puisse s'écouler quelques jours, deux ou trois au moins, entre la compensation approchée et la compensation sur les coffres. En agissant ainsi, cette dernière compensation pourra être assez parfaite pour que la déviation ne dépasse jamais 2° et même 1° 30′ en valeur absolue, tandis que si elle était faite, sans l'opération préliminaire, on pourrait avoir à compter quelques jours après avec des erreurs de 3 et 4°, qu'on devrait annuler en rectifiant la place des compensateurs.

Compensation partielle.

Quand on veut seulement corriger le compas de la déviation semi-circulaire, au moyen des deux groupes d'aimants horizontaux, les uns parallèles, les autres perpendiculaires à la quille, les opérations se bornent à mettre en place les barreaux comme il a été expliqué quelques pages plus haut.

Il est très utile de joindre à cette correction celle de l'erreur due à la bande au moyen de celles des méthodes précédentes, qui se rapportent au cas où la déviation quadrantale n'a pas été corrigée.

RECTIFICATION DE LA COMPENSATION A LA MER

I. *Pour les bâtiments ayant déjà navigué et munis du Flinders.* — Quand un bâtiment a déjà un ou ou deux ans de navigation et qu'on a pu fixer la barre de Flinders, on trouve en général que la compensation reste exacte pour tous les lieux du globe et on n'a plus à compter qu'avec les déviations anormales provenant d'une route suivie pendant plusieurs jours.

Quand donc on a fait les observations nécessaires pour calculer les déviations anormales, ainsi que nous l'avons expliqué à la fin de la troisième partie, étude des coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, on peut être sûr de sa route au degré près, et on n'a jamais besoin de déplacer les compensateurs aussi longtemps que l'armement, la coque et le chargement en fer du bâtiment ne varient pas eux-mêmes. Tout se borne à vérifier, à chaque changement de route, que la déviation observée a bien la valeur que les tables et le calcul du coefficient de route lui assignent. Si, de plus, on a un déflecteur à sa disposition, une seule observation d'écart, faite à la route suivie, remplacera en temps de brume l'observation de la déviation et sera un contrôle suffisant. Si, par suite de craintes particulières, d'atterrissages prochains, on voulait absolument être certain de son compas pour tous les changements de route possibles, trois observations soit de déviation, soit d'écart faites aux trois caps cardinaux adjacents les plus commodes à prendre pour la manœuvre et la moindre perte de route suffiraient pour cela. Ces observations dureront un quart d'heure à vingt minutes. La perte de temps qu'elles entraînent sera donc largement compensée par l'exactitude qu'elles permettront de donner aux changements de route, s'ils s'effectuent sans qu'on puisse prendre une variation. Mais, en général, comme nous l'avons dit, on n'aura même pas besoin de les faire pour un bâtiment ayant déjà navigué et dont le compas sera muni du Flinders.

II. *Pour les navires neufs ou non munis de Flinders.* — Pour un navire neuf, même muni du Flinders, et pour tous ceux qui ne possèderaient pas ce dernier correcteur, il y aura toujours lieu de vérifier de temps à autre la position des aimants correcteurs tant horizontaux que verticaux.

Plus le bâtiment est neuf, plus sa route est rapprochée de la perpendiculaire aux courbes d'égale force horizontale ou d'égale inclinaison (V. les planches), plus la brume ou la terre sont à craindre dans les parages où il se trouve, et plus le contrôle du compas et de la compensation au moyen des observations astronomiques doit être fréquent.

Le contrôle du compas peut se faire soit, sans relèvements avec le déflecteur (Voir Cinquième partie), soit, comme nous allons l'expliquer ici, au moyen de relèvements.

On opère le contrôle en observant, d'abord, la déviation à la route suivie par le bâtiment, puis en faisant successivement la même observation aux deux caps cardinaux du compas qui comprennent la route.

Quand une des trois déviations ainsi obtenues diffère de la valeur qu'elle avait au départ de deux degrés ou plus en valeur absolue ou en tenant compte des signes, il y a lieu de rectifier la compensation.

C'est surtout la position des aimants longitudinaux qu'il importe le plus de contrôler, et par suite ce sont les observations aux caps Est et Ouest qui sont les plus indispensables. Quand donc le temps ou la mer ne s'y oppose pas, il est bon de faire les trois observations de contrôle dans l'ordre suivant.

La route suivie. — Le cap Est ou Ouest du compas. Le cap Nord ou Sud du compas. Quand la route fait un angle moindre que 30° avec l'une des deux directions Nord-Sud ou Est-Ouest — il est bon de faire une quatrième observation au cap quadrantal intermédiaire entre les deux caps cardinaux.

RECTIFICATION, SANS CALCUL, DE LA POSITION DES AIMANTS

A chacun de ces trois caps, soit, la route, l'Est et le Nord du compas pour fixer les idées, on observe la déviation. De plus, après avoir couru à chacun des caps cardinaux du compas, on met le navire au cap magnétique de même nom d'après la règle de la page 6, et à ce cap magnétique on déplace les aimants correcteurs respectifs de façon à annuler la déviation observée. On note la position qu'ils occupent quand ce résultat est obtenu, puis on les remet à leur ancienne position.

Si une des trois observations de déviation montre qu'il y a lieu de rectifier la compensation, on met le cap à l'Ouest du compas, on observe la déviation, si elle est de même signe et précisément égale en valeur absolue, à un degré près, à la déviation observée cap à l'Est du compas, il n'y a pas lieu de déplacer des aimants longitudinaux.

Si cette condition n'est pas remplie, on met le cap à l'Ouest magnétique et on déplace ces aimants jusqu'à ce qu'ils annulent la déviation, on note la place qu'ils occupent alors, et on les met définitivement à la position moyenne entre celle qu'ils occupaient à l'Est puis à l'Ouest *magnétiques*, quand ils annulaient la déviation; puis, si cela est nécessaire (V. p.), remettant le navire à l'Ouest du compas, on observe la déviation qui reste à ce cap après ce déplacement des aimants.

On met ensuite le navire cap au Sud du compas, on observe la déviation; si elle est de signe contraire et précisément égale en valeur absolue, à un degré près, à la déviation observée cap au Nord du compas, les aimants transversaux sont correctement placés.

Si cette condition n'est pas remplie, on met le cap au Sud magnétique et on déplace les aimants jusqu'à ce qu'ils annulent la déviation, on note la position qu'ils occupent alors, puis on les fixe définitivement à la position moyenne entre celles qu'ils ont occupées successivement au Nord et au Sud magnétiques, alors qu'ils annulaient la déviation. Mettant ensuite, si cela est nécessaire (V. p.), le cap du navire au Sud du compas, on observe la déviation qui reste, à ce cap, après le déplacement des aimants.

Pour les bâtiments ayant déjà navigué quelque temps, et les compas bien placés, on trouvera généralement qu'il est inutile de déplacer les aimants transversaux. Mais tant qu'on n'aura pas placé convenablement le compensateur de fer doux appelé barre de Flinders, il faut s'astreindre à observer aussi fréquemment que possible les déviations cap à l'Est et cap à l'Ouest.

Sur un bâtiment neuf, et effectuant sa première traversée, nous conseillons même de s'astreindre pour contrôler le compas à courir à quatre et non pas à trois caps seulement. Ces quatre caps étant la route suivie, le Nord ou le Sud du compas, enfin l'Est et l'Ouest du compas. On s'assure ainsi de l'exactitude de la position des aimants longitudinaux, ou on la rectifie s'il y a lieu, et c'est la partie la plus variable de la compensation.

Dans les premières opérations de contrôle, il sera bon de courir également les deux caps Nord et Sud du compas ; on ne devra se dispenser de ce surcroît de précautions que quand trois contrôles successifs, effectués à des lieux différents, auront montré qu'il n'y a pas lieu de déplacer les aimants transversaux quand le navire change de lieu.

D'ailleurs le contrôle et la rectification des deux systèmes d'aimants, même en courant aux quatre caps cardinaux, ne prend pas plus de trente minutes, car lorsqu'on est resté quatre à cinq minutes à un des caps cardinaux du compas pour avoir une bonne observation de la déviation, on peut au cap magnétique du même nom, qui n'en est séparé que par quelques degrés, faire immédiatement, ou du moins au bout d'une minute ou deux, les opérations indiquées. C'est donc sept à huit minutes que prennent les opérations à faire aux deux caps cardinaux du même nom, du compas et magnétique dans les cas les plus défavorables et exceptionnels, c'est-à-dire quand l'angle des deux caps cardinaux de même nom, autrement dit la déviation à ces caps dépasse six à sept degrés.

Une fois la rectification des positions des deux systèmes d'aimants opérée, celle de la compensation partielle est évidemment terminée ; et cette rectification de la position des aimants est d'autant mieux faite que les déviations au Nord et au Sud du compas d'une part, à l'Est et à l'Ouest du compas d'autre part sont plus près d'être respectivement égales et de même signe (V. p.).

Quand on n'a pas eu le temps d'obtenir au départ une table ou une courbe complète des déviations, il faut, pour être capable de naviguer à deux degrés près, si la brume vous prend dans les parages du lieu où l'on a effectué la rectification, faire un tour d'horizon en s'arrêtant successivement aux huit cas principaux du compas.

Si on a obtenu au lieu de départ une table ou courbe complète des déviations, on n'aura pas besoin de faire un tour d'horizon pour se procurer la courbe et la table qui conviennent au nouveau lieu. Les observations antérieures suffisent pour cela.

Simplification de la rectification. — Quand le bâtiment a déjà navigué quelque temps, quand, en outre, plusieurs déterminations successives des quantités A et E ont montré que l'on pouvait compter sur la constance de ces deux quantités, les opérations précédentes se simplifient beaucoup. Il suffit de mettre le cap aux deux caps cardinaux du *compas* qui comprennent la route, d'y observer la valeur de la déviation et de déplacer les aimants conformément à ce que nous avons dit p. 229, au paragraphe de la rectification de la position des aimants au moyen du calcul des coefficients.

RECTIFICATION
DE LA COMPENSATION HORIZONTALE COMPLÈTE

On commence par rectifier la position des aimants comme nous l'avons dit dans le paragraphe précédent, en profitant des valeurs connues de A et E, si on les sait constantes.

Ensuite, sur un navire neuf, il y a lieu de voir s'il faut aussi changer la distance des sphères au centre du compas. Et pour cela il faut : 1° mettre successivement le navire à chacun des quatre caps quadrantaux du compas ; 2° observer la déviation à chacun de ces caps : calculer la valeur de D′ l'ajouter algébriquement à celle de D qui convient à la position actuelle des sphères, et opérer comme il est dit p.

Quand deux ou mieux trois contrôles successifs du compas dans des lieux différents ont montré qu'il n'y avait pas lieu de déplacer la position des sphères, on peut regarder celles-ci comme définitivement fixées et se borner ensuite dans les contrôles suivants à rectifier la position des aimants.

RECTIFICATION DE LA COMPENSATION POUR LA BANDE

Elle est en général inutile pour un compas compensé quand on a déterminé et corrigé séparément k et R (V. p. 233 z).

On l'effectue après la rectification de la compensation horizontale.

Il faut avoir, pour la faire, les cartes donnant les valeurs de la force horizontale et de l'inclinaison aux divers points du globe. Ces cartes forment les planches I et II qui se trouvent à la fin du livre.

Supposons d'abord que le navire ait changé de lieu sans changer d'hémisphère.

Exemples numériques. — 1er cas. — On n'a pas changé d'hémisphère. La compensation de la déviation due à la bande ayant eu lieu à Toulon (V. page 48), on veut rectifier cette compensation de façon à ce qu'elle annule les erreurs dues à la bande, en un lieu situé par 20° de latitude Nord et 20° de longitude Ouest de Paris.

A terre, à Toulon, le poids de levier du contre poids qui rendait l'aiguille horizontale était de 1,9 et correspondait à la force verticale magnétique terrestre

$$Z = H \tang \Theta = 2{,}25$$

car à Toulon on a :

$$H = 1{,}23, \quad \tang \Theta = \tang 61°30' = 1{,}83$$

Au lieu défini par 20° de lat. Nord et 20° de long. Ouest, on a pour la valeur nouvelle de la force verticale $Z' = H' \tang \Theta' = 1{,}6$ puisque dans ce lieu $H' = 1{,}6$ et $\tang \Theta' = \tang 45° = 1$.

Il faut chercher le bras du levier du contrepoids qui convient à cette nouvelle valeur de la force verticale ; c'est-à-dire la distance de l'axe de rotation à laquelle le contrepoids doit être placé pour ramener à l'horizontalité l'aiguille soumise à la seule force terrestre au second lieu d'observation.

En appelant x ce bras de levier, on aura évidemment :

$$\frac{x}{a} = \frac{Z'}{Z} \qquad x = 1{,}9 \times \frac{1{,}6}{2{,}25} = 1{,}2 \text{ environ.}$$

A bord, au cap Est ou Ouest magnétique, et dans le second lieu d'observation, l'aiguille est soumise à la force $\lambda Z'$, λ étant le facteur déterminé, comme nous l'avons dit.

Ce facteur, pour un navire ayant navigué quelque temps, peut être considéré comme constant, et pour un navire neuf, il ne varie, dans l'intervalle de deux ou trois mois, que de quantités insensibles, un ou deux centièmes de sa valeur; on peut donc prendre pour cette dernière le nombre déterminé avant le départ.

Il en résulte que le bras de levier du contrepoids à bord, dans le second lieu d'observation, devra être, dans le cas particulier que nous examinons : $1,2 \times 0,8 = 0,96$.

On place le contre-poids à cette distance.

On met le navire au cap Est ou Ouest magnétique, et on rend horizontale, au moyen des aimants verticaux, l'aiguille d'inclinaison orientée Nord-Sud magnétique et mise dans la cuve du compas, à la place qu'occupaient les aiguilles de la rose, momentanément retirée.

2ᵉ CAS. — Le navire a changé d'hémisphère et navigue dans l'hémisphère Sud.

Les mêmes raisonnements et les mêmes calculs s'appliquent encore : seulement il ne faut pas oublier que l'inclinaison change de signe quand on passe d'un hémisphère à l'autre. Par conséquent tang Θ' a une valeur négative, ainsi que Z' et par suite x, ce qui indique qu'il faut faire passer le contrepoids d'un côté à l'autre de l'aiguille.

Pour un lieu où on aurait

$$H' = 1,6 \quad \Theta' = -45^\circ \quad \text{tang}\,\Theta' = -1$$

x serait égal à $-1,2$ et on devrait, à bord, placer le contrepoids à $-0,96$ de l'axe de rotation, c'est-à-dire sur la moitié de l'aiguille autre que celle qu'il occupait dans l'hémisphère Nord.

L'orientation des aimants verticaux se fait dans l'hémisphère Sud par la règle suivante.

Règle pratique pour l'hémisphère Sud. — Si, à bord, le contrepoids en papier se trouve en haut, placez les aimants verticaux le bleu en haut.

Si, au contraire, à bord, le contrepoids en papier se trouve en bas, placez les aimants verticaux le rouge en haut.

BARRE DE FLINDERS, SA MISE EN PLACE

Quand un navire a déjà navigué quelque temps, on peut placer avec une grande exactitude, au moyen d'observations faites en deux lieux différents, le compensateur de fer doux ainsi nommé. Il offre le grand avantage de rendre fixe, ou à très peu près, pour tous les lieux du globe, la position des aimants longitudinaux. Comme ce sont ordinairement les seuls qu'on ait à déplacer, il s'ensuit que le contrôle peut être moins fréquent, qu'il ne sert qu'à vérifier l'exactitude de la compensation, et qu'on évite ainsi les pertes de temps et les soins qu'entraîne la rectification.

Cette barre se compose de cylindres de fer doux, tous de même diamètre, mais de hauteur inégale, qu'on peut empiler les uns au-dessus des autres dans une gaine de laiton verticale vissée sur l'habitacle, et dont l'axe parallèle à celui du compas se trouve, avec ce dernier, soit dans le plan longitudinal du navire, pour les compas de relèvements; soit dans un plan parallèle, pour les compas de route. L'ensemble de ces cylindres forme donc une barre de hauteur variable, suivant le nombre et la hauteur des cylindres qui la composent. Il faut avoir soin d'empiler les cylindres par ordre de hauteur, le plus bas étant celui de moindre hauteur, et le plus long étant le plus élevé.

L'ensemble continu des cylindres de fer repose sur une colonne de bois, formée également de cylindres de même diamètre et de différentes longueurs, et à laquelle on peut, par conséquent, donner la longueur voulue pour mettre le niveau supérieur de la barre de fer à la hauteur convenable.

Pour se servir utilement de ce compensateur, il faut savoir quelle hauteur il convient de lui donner, et si on doit le placer sur l'avant ou sur l'arrière de l'habitacle.

Deux observations faites dans *deux lieux différents*, ou une seule faite quand le navire passe d'un hémisphère magnétique dans l'autre et traverse la ligne d'inclinaison nulle, les cartes de force horizontale et d'inclinaison sont nécessaires pour résoudre le problème.

Si on appelle H et Θ les valeurs de la force horizontale et de l'inclinaison au premier lieu d'observation; H_1 et Θ_1 les valeurs respectives de ces deux quantités au second lieu d'observation, il convient de choisir ces deux lieux de façon que la différence $H_1 \tan \Theta_1 - H \tan \Theta$ ait la plus grande valeur possible.

Comme on compte l'inclinaison et sa tangente, positivement dans l'hémisphère Nord magnétique et négativement dans l'hémisphère Sud magnétique, il en résulte que les deux termes de cette différence s'ajoutent en valeur absolue quand les observations sont faites respectivement dans chacun des hémisphères magnétiques séparés, comme on sait, par la ligne d'inclinaison nulle et qui coïncident d'ailleurs, à très peu près, avec les hémisphères terrestres. On est donc toujours, alors, dans des circonstances favorables à l'exactitude des opérations, qui est d'ailleurs d'autant mieux assurée que la différence algébrique indiquée plus haut a une valeur absolue plus considérable.

Appelons B (V. p.) la moitié de la différence, prise avec son signe, entre la déviation observée à l'Est et celle observée à l'Ouest du compas, au lieu de départ, après la compensation complète, la place des divers compensateurs étant déterminée et notée.

Dans le courant de la traversée on déplace les compensateurs suivant les règles données pour rectifier la compensation, mais pour faire les observations nécessaires à la mise en plaee de la barre de Flinders, au second lieu d'observation, il faut remettre tous les compensateurs à la place exacte qu'ils occupaient au port de départ, place qui a dû être notée avec soin sur le cahier des montres, comme nous l'avons dit.

Soit B_1 la nouvelle valeur de la différence indiquée au second lieu d'observation, quand la condition précédente est remplie.

Calculons les deux quantités :

$$\frac{H_1 \sin B_1 - H \sin B}{H_1 \tan \Theta_1 - H \tan \Theta} \text{ et } \frac{H \sin B \times H_1 \tan \Theta_1 - H_1 \sin B_1 \times H \tan \Theta}{H_1 \tan \Theta_1 - H \tan \Theta}$$

Appelons la première $\frac{c}{\lambda}$ et la seconde $\frac{P}{\lambda}$

Formons les deux produits $\frac{c}{\lambda} \tan \Theta_1$ et $\frac{P}{\lambda} \times \frac{1}{H_1}$

On trouve les différentes valeurs de $\frac{1}{H}$ en marge de la carte des forces horizontales Pl. I. Afin de convertir, en degrés et minutes, ces deux nombres qui représentent des grandeurs mesurées avec le rayon pour unité, multiplions chacun d'eux par 57°3′ nombre de degrés contenus dans l'arc de longueur égale au rayon. Convertissons les dixièmes de degré en minutes; nous obtiendrons ainsi deux nombres de degrés et *minutes* que nous appellerons respectivement pour simplifier C^o et P^o. La théorie apprend que l'on doit avoir $C^o + P^o = B_1$. Pour que l'on puisse compter sur une exactitude suffisante, il faut que cette égalité soit satisfaite à trente minutes près, sinon on doit recommencer les calculs et au besoin les observations.

Ces deux nombres de degrés et minutes apprennent qu'on doit, au cap Est ou Ouest du compas, corriger la déviation de la quantité B_1, non plus au moyen des seuls aimants, mais $-P^o$ avec les aimants et $-C^o$ avec la barre.

Autrement dit, si $B_1 = -6^o$, $P^o = -4^o$ et $C^o = -2^o$, au cap Est on devra mettre les aimants correcteurs de façon à ce qu'ils produisent une déviation de $+4^o$ et la barre de Flinders de façon à ce qu'elle produise une déviation de $+2^o$

Au cap Ouest, le facteur qui multiplie B_1, changeant de signe, ce coefficient donnerait une déviation de $+6^o$. On doit mettre alors les aimants correcteurs de façon à ce qu'ils produisent une déviation de -4^o; et la barre de Finders de façon à ce qu'elle produise une déviation de -2^o. On trouvera ainsi pour les aimants et pour la barre la même position que tout à l'heure, puisque le cap ayant changé de 180^o, la déviation produite par les aimants et la barre, occupant la même position que tout à l'heure au cap Est, change de signe.

Si la valeur de $\frac{c}{\lambda}$ est positive, il faut placer la barre de Flinders sur l'arrière de l'habitacle.

Si cette valeur est négative, il faut placer la barre de Flinders sur l'avant de l'habitacle.

Exemples numériques. — 1^er^ Cas. — Le navire n'a pas changé d'hémisphère.

A Cherbourg où $H = 1{,}05$ $\Theta = +67^o$ Tang $\Theta = 2{,}35$; on a trouvé après la compensation faite : $B = +1^o\,30'$; sin $B = +0{,}026$.

On veut mettre la barre de Flinders en place à Saïgon ; en ce lieu :

$$H_1 = 2{,}2 \qquad \Theta_1 = 2^o, \qquad \text{Tang } \Theta_1 = 0{,}03$$

et les compensateurs occupant exactement la même position qu'à Cherbourg, on a trouvé :

$$B_1 = -3^o\,30' \quad \text{soit sin } B_1 = -0{,}06$$

En opérant, pour ce cas particulier, les opérations indiquées, on a :

$$\frac{c}{\lambda} = +0{,}066 \quad \frac{P}{\lambda} = -0{,}136$$

Donc :

$$\frac{c}{\lambda} \operatorname{Tang} \Theta_1 \times 57^\circ 3 = +0{,}11 \text{ soit } + 0^\circ 6' = C^\circ$$

$$\frac{P}{\lambda H_1} \times 57^\circ 3 = -3{,}5 = -3^\circ 30' = P^\circ$$

$\frac{c}{\lambda}$ est positif, donc il faut mettre la barre de Flinders sur l'arrière de l'habitacle.

Mettons le cap du navire à l'Est. Ceci fait, 1° on déplace les aimants longitudinaux, de façon à produire une déviation égale à $+ 3°30'$. Pour cela, il faut les approcher si leur extrémité rouge est sur l'arrière et, au contraire, les éloigner si leur extrémité rouge est sur l'avant; 2° quand C° est moindre que 30′ on n'en tient pas compte, et on ne met pas de cylindres de fer doux, mais pour compléter l'exemple, nous dirons ici : placez la gaine de laiton sur l'arrière de l'habitacle, et mettez-y un des plus petits cylindres doux dont le niveau supérieur devra dépasser celui des aiguilles de un sixième environ de la longueur du cylindre.

2° cas. — Le navire a changé d'hémisphère.

Dans ce cas, dans le lieu de l'hémisphère Sud, l'inclinaison et sa tangente doivent être comptées négativement.

La compensation a été faite à Cherbourg comme tout à l'heure. On veut mettre la barre de Flinders en place à Rio-de-Janeiro. En ce lieu, on a :

$$H_1 = 1{,}61 \quad \Theta_1 = -11^\circ \quad \operatorname{Tang} \Theta_1 = -0{,}19$$

Et les compensateurs occupant exactement la même position qu'à Cherbourg, on a trouvé :

$$B_1 = -3^\circ 30' \text{ d'où } \sin B_1 = -0{,}06$$

Dans ce cas, on trouve :

$$\frac{c}{\lambda} = +0{,}044 \qquad \frac{P}{\lambda} = +0{,}082$$

D'où :

$$\frac{c}{\lambda} \operatorname{tang} \Theta_1 \times 57^\circ 3 = -0.5 = -0^\circ 30' = C^\circ$$

$$\frac{P}{\lambda H_1} = -2{,}9 = -2^\circ 54' = P^\circ$$

$\frac{c}{\lambda}$ est négatif, il faut donc placer la barre de Flinders sur l'avant de l'habitacle.

Le cap du navire étant mis à l'Est du compas : 1° On déplace les aimants longitudinaux de façon à produire une déviation égale à $+ 2^\circ 54'$. Pour cela il faut, comme on l'a déjà dit plus haut, les approcher si leur extrémité rouge est sur l'arrière, et au contraire les éloigner si leur extrémité rouge est sur l'avant; 2° On place la gaine de laiton sur l'arrière de l'habitacle, on met à la partie supérieure un des plus petits cylindres de fer doux, de façon que son niveau supérieur dépasse celui des aiguilles du sixième environ de sa longueur et qu'il produise une déviation de $+ 0^\circ 30'$

3ᵉ cas. — Le navire traverse l'équateur *magnétique*, c'est-à-dire la ligne où l'inclinaison est nulle, alors aucun calcul n'est nécessaire.

En un point de cette ligne, on détermine la valeur du coefficient B le plus exactement possible en observant la variation cap à l'Est et cap à l'Ouest du compas. Quand le navire aura tenu pendant un jour ou plus des routes, toutes situées dans un même quadrant de la rose, avant d'arriver sur l'équateur magnétique, il sera bon, avant d'observer les deux variations nécessaires, de faire deux tours successifs d'horizon, en sens contraire l'un de l'autre, de manière à annuler ou à peu près le coefficient de route (Voir Étude de B et C, fin de la Troisième partie).

Une fois qu'on a la valeur de B, on met le navire à celui des deux caps Est ou Ouest du compas le plus commode pour la route et la manœuvre, et sachant alors que le fer doux n'a plus aucune influence, en ce point du globe, sur la valeur du coefficient B, on manœuvre es aimants correcteurs de façon à ce que la déviation du compas, à ce cap, devienne égale à A + E (Voir plus haut). Ceci étant, on peut considérer les aimants comme placés d'autant plus exactement que les observations auront été faites avec plus de soin, et que l'on aura diminué davantage l'influence du coefficient de route.

Quand dans des lieux où l'inclinaison aura des valeurs sensibles, la déviation prendra des valeurs différant de A + E de plus de 1°, on n'aura plus qu'à mettre des cylindres de fer doux en place, de façon à ramener la déviation à cette valeur. A mesure que tang Θ croîtra, on sera obligé de modifier et d'augmenter la longueur ou le nombre des cylindres employés; après quelques tâtonnements, la déviation aux caps Est ou Ouest du compas restera constante et égale à A + E, sauf la valeur du coefficient de route, et indiquera ainsi que les aimants et la barre de Flinders sont exactement placés.

La barre de Flinders ne doit être mise en place qu'après avoir fait toutes les opérations de la compensation, y compris la compensation pour la bande.

Seule, l'observation des déviations permet de fixer convenablement la position et la longueur de cette barre et il faut se résigner, dans certains cas, à des tâtonnements inévitables mais très simples.

En effet, quand, par le fait des compensations antérieures, son extrémité inférieure est voisine des pôles des aimants verticaux et longitudinaux, elle subit, de la part de ces pôles, une sorte d'induction qui peut faire varier de plusieurs degrés la déviation que la barre aurait causée sans cette circonstance. Il faut être prévenu de ce fait, car toutes les fois qu'il se produit, il est nécessaire de vérifier, aussitôt qu'on le peut, au moyen d'observations faites au cap Est ou Ouest du compas, si la longueur de la barre est correcte. Si, malgré le changement de lieu, le coefficient B a conservé la même valeur à 1° près, la barre est de bonne longueur; au contraire, si les variations de ce coefficient atteignent encore plusieurs degrés durant la traversée, on devra, au nouveau lieu d'arrivée, recommencer à nouveau les calculs et les observations qui permettront cette fois, d'avoir la longueur exacte de la barre. L'essentiel c'est de ne pas oublier de remettre, au dernier port d'arrivée, tous les compensateurs dans la position qu'ils avaient au port de départ.

On ne se sert pas encore couramment de ce compensateur; pourtant son emploi serait des plus utiles. Pour les navires faisant toujours les mêmes traversées, on peut arriver après un ou deux tâtonnements à ne plus avoir à toucher les aimants longitudinaux, ni par suite, à rectifier la compensation, ce qui assure la précision de la route sans aucune perte de temps. L'avantage de ce compensateur est donc hors de toute proportion avec la demi-heure qu'exigent les calculs et l'opération de sa mise en place. A bords des transports réguliers, des grands paquebots, on ne devrait jamais négliger de prendre cette légère peine.

La barre de Flinders a encore d'autres avantages : d'abord elle corrige complètement et d'une façon permanente la partie de l'erreur due à la bande provenant des pièces verticales de fer avoisinant le compas donnant c et qui, maxima aux caps Est et Ouest, est nulle aux caps Nord et Sud du compas. De plus quand on met son extrémité supérieure à un niveau convenable, elle corrige en partie une autre des fractions constitutives de l'erreur due à la bande, celle qui provient de k. Mais, pour arriver à ce résultat, il faut placer son extrémité supérieure à un niveau différent de celui qui correspond au maximum d'effet de la barre pour la correction partielle de B.

Quand on se borne à la correction de B et à celle de l'erreur due à la bande provenant des pièces verticales donnant c, voici ce qu'on peut dire de général sur le niveau auquel il convient de placer l'extrémité supérieure de la barre. Si on n'emploie qu'un seul cylindre, ou que la hauteur totale des cylindres employés ne dépasse pas 10 à 20 centimètres, il faudra que le niveau supérieur de la barre dépasse celui des aiguilles du sixième de la hauteur totale environ. Quand la hauteur dépasse 20 centimètres, on place ce niveau de 4 à 5 centimètres au-dessus de celui des aiguilles.

L'expérience montre que la barre de Flinders doit être en général placée sur l'avant de l'habitacle, 1° pour la grande majorité des compas de passerelles situées d'ordinaire dans le tiers central de la longueur du navire et en avant des machines; 2° pour les compas de route placés à quelques pieds seulement en avant de l'étambot ou de la tête d'un gouvernail en fer.

Au contraire, la pratique montre que la barre doit être, en général, placée sur l'arrière de l'habitacle pour tout compas, situé dans le tiers postérieur de la longueur du navire, mais séparé du gouvernail et de l'étambot par plus de 3 mètres.

C'est sur ces indications générales, qui n'ont d'ailleurs rien d'absolu, qu'on a basé une mise en place sans calcul de la barre de Flinders, au lieu de départ même, sans qu'on puisse avoir par conséquent les éléments indispensables à cette mise en place exacte qui sont, comme nous l'avons dit, deux déterminations de la valeur de B, faites dans deux lieux différents, mais avec une distribution identique des pièces de fer avoisinant le compas, ou encore la détermination de B faite en un point de l'équateur magnétique.

Mise en place empirique. — Nous ne conseillerons jamais à ceux qui ne sont pas familiers avec la déviation des compas de procéder ainsi à la mise en place de la barre de Flinders. Pour ceux, au contraire, qui ont déjà étudié attentivement leurs compas, au moyen des coefficients, il est bien clair qu'ils pourront, en suivant avec soin les valeurs du coefficient B, en examinant comment varient, en même temps, les quantités H et Θ, placer la barre de Flinders assez exactement, sans calcul, et au courant des traversées du bâtiment.

Par exemple, supposons qu'au départ le coefficient B ait été annulé ou à très peu près par des aimants longitudinaux seulement. Aussitôt après le départ des ports de France et alors que la valeur de H ne subit que des variations très faibles moindres que un dixième, tandis que la valeur de Θ a varié de 5 à 6°, on remarque que la déviation sur la route Est par exemple a varié de quelques degrés, mettons $+3$ pour fixer les idées; il est alors vraisemblable que c a une valeur positive; on devra donc mettre la barre de Flinders sur l'arrière, et la composer de cylindres de fer doux qui, en ce lieu, ramènent la valeur de la déviation à $A + E$. Mais on voit qu'il est nécessaire d'examiner avec soin et simultanément le sens des variations des différents éléments qui constituent le coefficient $\mathfrak{B}$. On rectifie la longueur donnée ainsi à la barre au moyen des observations et de la manière suivante.

La remarque suivante peut abréger les tâtonnements. Les documents publiés jusqu'ici montrent que si l'on appelle α l'angle dont la tangente naturelle est égale à $\frac{Q}{P}$ (compté de 0° à 36° à partir de l'avant en passant par tribord), la droite qui limite cet angle se trouvait à très peu près, pendant la construction du bâtiment, sur la direction du Sud magnétique. Ceci étant si, la déviation quadrantale étant corrigée, on met le bâtiment à un cap tel que $\zeta' + \alpha = 0°$ ou $180° \pm 360°$, la déviation observée proviendra du seul fer doux vertical puisque l'aimant permanent du navire coïncide avec la direction du cap au compas, on devra donc corriger la déviation observée avec la barre de Flinders seulement. En mettant le navire à ces deux caps diamétralement opposés particuliers, la barre de Flinders nécessaire pour annuler la déviation variera de longueur. On devra prendre la longueur moyenne. Mais lors bien même qu'on n'aurait pas le temps de faire la seconde observation, on saura du moins, au moyen de la première, la longueur approximative de la barre et sa position exacte.

Emploi du Flinders pour l'erreur due à la bande. — Si le parametre k est positif, il faudra introduire un k négatif, et, par conséquent, mettre le niveau supérieur de la barre au-dessus de la rose.

On mettra ce niveau au-dessous de la rose, si k est négatif et qu'on ait besoin, par conséquent, d'introduire un k positif.

Supposons que le calcul de k et R effectué d'après les formules p. 202 ait donné $k = +\ 0{,}09$ et $R = +\ 0{,}60$

D'après l'expression de J, p. 86, formule 22, il faut pour annuler ce coefficient introduire un $+\ k$ et un $+$ R puisque e a été rendu nul ou négligeable par la correction de la déviation quadrantale. Les signes trouvés pour k et R indiquent de suite comment il faut manœuvrer la barre et quelle est l'orientation qu'il faut donner à l'aimant correcteur vertical.

1er Cas. — **Sans balance d'inclinaison.**

$$\lambda = 0{,}96 \quad \theta = +\ 60^\circ \quad \text{tang}\ \theta = +\ 1{,}73 \quad H = 1.3$$
$$H\ \text{tang}\ \theta = Z = 2.24 \quad \lambda\ H = 1.24.$$

1° *Le navire droit.* — On peut placer l'aimant vertical correcteur de R.

Dans ce lieu en effet, en se rapportant à l'expression de J, cet aimant doit ajouter à ce coefficient une quantité égale à $+\ \frac{R}{\lambda H}$ soit 0,48.

Le signe trouvé pour R nous dit que l'aimant correcteur doit avoir son pôle bleu supérieur. On trouve la distance entre ce pôle et le centre du compas sans avoir besoin de faire incliner, il suffit de le placer sur le plan horizontal qui contient les aiguilles, de l'élonger sur la ligne Est-Ouest et de l'approcher des aiguilles jusqu'à ce que la rose tourne d'un angle dont la tangente naturelle soit égale à $+\ 0{,}48$ soit 26°. On mesure, à ce moment, la distance du pôle bleu au centre. C'est à cette distance, au-dessous du centre, qu'il devra être suspendu quand l'aimant sera vertical. On le fixe dans cette position verticale ainsi déterminée, et l'effet du magnétisme permanent sur la bande peut être considéré comme annulé pour tous les points du globe, tant que R ne changera pas. Pour déplacer convenablement la barre de Flinders, comme on ne peut opérer ainsi, il faut alors agir de la façon suivante : on met le navire droit cap Nord du compas, puis on lui fait donner le nombre le plus considérable de degrés de bande compatible avec sa masse et le service du bord. Dans cette position inclinée du navire le compas marquera un cap différant du Nord, on le ramène à ce cap en déplaçant convenablement la barre de Flinders. L'observation sera d'autant plus aisée que la valeur de θ sera plus grande.

2^e Cas. — **Avec une aiguille ou balance d'inclinaison.** — *Le navire droit.* — Les deux valeurs μ_1 et μ_2 de μ au départ et à l'arrivée donnent k et R. On connaît aussi le bras de levier du contrepoids qui rend l'aiguille horizontale à terre dans le lieu d'arrivée, soit a. Soit b ce bras de levier à bord au cap Est ou Ouest. On partage la quantité $b - \lambda a$ en deux parties proportionnelles à R et à k, soient p et q.

On déplace le contrepoids qui est dans la position b, de la quantité p et on ramène l'aiguille à l'horizontalité au moyen de l'aimant vertical seul.

Puis on déplace le contrepoids de la quantité q et cette fois on ramène l'aiguille à l'horizontalité au moyen de la barre de Flinders seule.

L'opération n'offre aucune difficulté ; je ne donne pas d'exemple numérique.

3^e Cas. — **En un point de l'équateur magnétique.** — *Avec une balance d'inclinaison.* — Mettez le navire cap Est ou cap Ouest du compas compensé, puis la balance d'inclinaison étant orientée et placée comme on l'a dit et n'ayant de plus aucun contrepoids, rendez-la horizontale au moyen de l'aimant vertical seulement. Celui-ci est alors convenablement fixé. On profitera de la première occasion favorable dans un lieu où θ aura une valeur considérable pour déplacer convenablement la barre de Flinders.

Sans balance d'inclinaison. — Le navire étant cap au Nord et droit sur sa quille, faites-lui donner une bande de quelques degrés et ramenez la rose au Nord au moyen de l'aimant vertical seulement.

N. B. — 1° Quand on aura déplacé la barre de Flinders qui corrigeait seulement le terme en c de $\mathfrak{B}$ pour lui faire corriger à la fois les termes en c et en k, elle n'aura plus son effet maximum dans le plan horizontal de la rose ; autrement dit, il faudra en modifier de nouveau et légèrement la longueur pour que la composante magnétique qu'elle donne dans le plan de la rose corrige toujours le terme en c.

2° Il faut bien remarquer que la barre de Flinders, comme aussi les correcteurs de fer doux, ne peuvent être employés que pour les compas dont les aiguilles ont une intensité magnétique assez faible pour ne pas produire sur ces compensateurs une induction qui, variable avec le cap du bâtiment, aurait plus d'inconvénient que les erreurs qu'on s'était proposé de corriger.

Conclusion. — MM. Gaschard et Maureau, lieutenants de vaisseau, ont mis en place, sur le transport de l'État *Le Tonkin,* à la fin de 1884, la barre de Flinders. Pour ce bâtiment et ce compas particuliers, cette barre avait une longueur totale de $0^m,590$, et était formée de cinq cylindres dont les hauteurs respectives étaient, à partir du plus bas d'entre eux, 0,02 ; 0,04 ; 0,075 ; 0,15 et 0,305.

L'action de la barre ainsi composée croissait de 0 à + 22° entre l'équateur magnétique et le parallèle de Brest ; elle a permis à ces deux officiers d'abord de n'avoir pas à rectifier la position des compensateurs et ensuite de pouvoir prédire à l'avance la déviation du compas dans un lieu et à un cap donnés à 1° près, dans les traversées postérieures qui ont amené successivement le *Tonkin* à Brest, Toulon, Saïgon, Formose et Madagascar. C'est le premier exemple, venu à ma connaissance, de l'emploi de ce compensateur à bord d'un des navires de l'État, et on voit qu'il a donné tous les résultats que j'avais annoncés dans mes brochures de juillet 1884.

En mai 1885, M. le lieutenant de vaisseau E. Perrin a mis également en place le Flinders à bord du croiseur le *La Galissonnière*, portant le pavillon du contre-amiral Lespès dans les mers de Chine. L'opération a été effectuée à Taoutse ; la longueur de la barre a été arrêtée après quelques tâtonnements à $0^m,36$, et depuis lors les déviations observées, qui n'ont jamais dépassé 2° dans sa traversée de retour de Hong-Kong à Toulon, se sont toujours accordées au degré près avec les déviations calculées.

A bord du transport *La Nive*, on a également mis sur place le correcteur, mais je n'ai aucun renseignement sur cette opération.

Tous ceux qui auront lu ce qui précède ne sauraient s'étonner de ce qu'une même valeur de c se corrige sur des bâtiments différents, car il y a lieu de tenir compte de l'induction que les aimants horizontaux et verticaux exercent sur la barre, et l'intensité de cette induction varie avec leurs distances respectives à cette barre.

Si donc on veut mettre en place cette barre et faire le très petit nombre d'observations très faciles qui permettent d'obtenir les valeurs des coefficients de route, on pourra calculer sa déviation à 2° près.

Les déviations produites, cap à l'Est ou cap à l'Ouest, par une même barre de Flinders sont éminemment variables, parce qu'elles dépendent non pas seulement de tang Θ, à laquelle elles sont proportionnelles, mais aussi de l'induction exercée sur cette barre par les aimants correcteurs. De plus, l'action de chacun des cylindres dépend du nombre et de la forme de ceux avec lesquels il est employé.

Voici quelques nombres qui serviront à fixer les idées :

A terre, à Paris, où la tangente naturelle de l'inclinaison est égale à 2,2 environ, toute la barre de Flinders donne une déviation de 34°

Si on enlève un des plus petits cylindres de 19^{mm}, elle ne donne plus que 33°

Puis ensuite un autre cylindre de 19^{mm}, elle ne donne plus que 32°

Puis ensuite un cylindre de	37^{mm},	—	—	28°
Encore un cylindre de	74^{mm},	—	—	23°
Enfin un cylindre de	150^{mm},	—	—	12°

Dans un autre lieu où l'inclinaison serait Θ' au lieu de Θ, il faudrait multiplier tous ces nombres par $\frac{\text{tang } \Theta'}{\text{tang } \Theta}$.

Enfin, à bord d'un navire où la force moyenne est λ, ces nombres devraient être, pour le lieu d'inclinaison Θ', multipliés par $\frac{\text{tang } \Theta'}{\lambda \text{ tang } \Theta}$.

Toute la barre de Flinders corrige à terre un coefficient c égal environ à 0,2 ; et comme λ est égal à 0,900 environ, à bord, on peut corriger une valeur de $\frac{c}{\lambda}$ égale à 0,22 environ, qui n'a jamais été atteinte encore par cette quantité.

Résumé des règles pratiques de la compensation.

1. Mettre le compas aussi loin que possible de toute pièce considérable de fer.

2. Ne commencer les opérations qu'après avoir détruit, autant que possible, par des tours d'horizon effectués alternativement en sens contraire, l'influence nuisible d'un même cap tenu plusieurs jours par le bâtiment et avoir fait, s'il est possible, une compensation approximative.

3. S'habituer à compenser en ayant toujours, en face de soi, le centre de la rose et le Nord magnétique.

4. La grandeur et le signe de la déviation sont donnés à chaque cap par la relation.

Déviation = Cap magnétique — Cap au compas.

5. L'observateur étant placé comme dans 4, quand il faut faire tourner la rose de droite à gauche,

S'il n'y a pas d'aimants, on met leur extrémité rouge à sa droite;

S'il y a déjà des aimants avec leurs extrémités rouges à droite; on les approche;

Si ces extrémités sont à gauche, on les éloigne;

Quand il faut faire tourner la rose de la gauche vers la droite et qu'il n'y a pas d'aimants, on met leur extrémité rouge à gauche;

S'il y a des aimants avec leurs extrémités rouges à gauche, on les approche;

Si ces extrémités rouges sont à droite, on les éloigne;

Si vous avez les données nécessaires compensez cap à l'Est ou à l'Ouest avec les aimants longitudinaux et la barre de Flinders simultanément.

6. Mettez ensuite les sphères en place. Dans la grande majorité des cas on ne risque rien de mettre, avant toute autre opération, les sphères en place de manière à corriger un + D égal à 2°.

On choisit pour cela des sphères d'un diamètre tel qu'elles corrigent cette erreur quand elles sont à peu près à leur distance maxima.

7. Faites la compensation pour la bande.

8. A la première occasion favorable, mettez le Flinders en place, si vous avez les données nécessaires.

9. Que vous ayez mis ou non le Flinders en place, vérifiez alors la compensation et rectifiez-la si cela est nécessaire au moyen du calcul des coefficients.

N. B. — Toutes les fois qu'un navire traverse l'équateur magnétique profitez-en pour placer, sans calcul et correctement pour tous les lieux du globe, les aimants longitudinaux et verticaux.

Remarque. — Les distances données dans les tableaux suivants sont des distances approximatives qui correspondent à la valeur la plus ordinaire de λ pour les compas de relèvements bien placés, soit 0,950 environ. Ces distances peuvent donner une indication grossière du plus ou moins de convenance de la place adoptée pour le compas. En effet si deux sphères, une fois les aimants en place, corrigent une déviation notablement supérieure ou inférieure à celle indiquée par le tableau c'est que la force directrice du compas est plus faible ou plus forte que la valeur moyenne. Quand il n'y a pas de masses de fer transversales près du compas, on accélère la compensation en plaçant *à priori* et avant toute autre opération des sphères capables de corriger un D de + 3°. On continue les opération ensuite comme il est dit plus haut.

ERREUR à CORRIGER.	DISTANCES AU CENTRE DU COMPAS DES POINTS LES PLUS VOISINS DES DEUX SPHÈRES.										
	Sph. de 227mm.	Sph. de 247mm.	Sph. de 216mm.	Sph. de 203mm.	Sph. de 190mm.	Sph. de 178mm.	Sph. de 164mm.	Sph. de 152mm.	Sph. de 140mm.	Sph. de 127mm.	Sph. de 115mm.
	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.	m. m.
1° 0′	579	521	494	463	433	404	376	346	318	290	260
1 30	491	440	416	392	366	341	318	294	269	245	221
2	432	388	367	347	324	303	281	260	239	216	196
2 30	393	353	332	316	294	275	255	230	216	197	178
3	361	325	309	290	270	254	235	217	199	182	162
3 30	338	305	289	271	254	237	220	203	186	168	152
4	317	286	271	254	237	222	207	190	175	158	143
4 30	301	271	255	241	226	211	196	180	164	150	135
5	286	258	243	229	215	201	186	171	157	144	128
5 30	273	246	233	219	206	191	178	164	149	137	124
6	261	235	222	210	197	184	170	157	144	132	119
6 30	252	227	214	201	188	176	163	151	139	126	116
7	242	219	206	194	182	169	157	146	133	121	110
7 30	234	210	198	186	176	162	152	140	128	117	107
8	227	203	192	182	170	158	147	135	125	114	102
8 30	220	197	186	176	164	153	143	132	121	110	98
9	214	191	181	170	158	149	139	128	117	107	95
9 30	208	186	176	164	154	145	134	124	114	104	92
10	202	181	171	160	151	141	131	121	111	102	90
10 30	197	177	165	157	147	137	127	118	109	99	89
11	190	171	161	152	143	133	124	115	107	95	87
11 30	186	166	158	149	140	130	121	113	103	93	83
12	182	163	154	146	136	127	119	110	101	91	82

Les limites d'excursion des sphères pour le compas dont la rose a 25 centimètres de diamètre, sont 190mm et 356mm — r; par conséquent les sphères nécessaires pour corriger les valeurs les plus ordinaires de D soit 1 à 9° sont celles de 140mm, 190mm et 229mm. Une fois D corrigé, il suffira de mettre en plan des sphères qui annulent cette erreur quand elles sont à peu près à mi-course, et on aura alors une marge bien suffisante pour rectifier seulement leur position dans le cours de la campagne si D varie, sans avoir à changer des phères.

ERREUR à CORRIGER.	SPHÈRES de 305mm.	SPHÈRES de 279mm.
12° 0′	218	201
12 30	213	197
13	208	191
13 30	204	187
14	201	183
14 30	197	180
15	192	176
15 30	189	173
16	158	170

Compas compensé de M. Joseph Peichl. — Lieutenant de vaisseau dans la Marine Impériale et Royale Autrichienne, M. Peichl a imaginé un compas compensé auquel il donne le nom de Compas-Breveté avec Correcteur Universel. Cet instrument permet d'annuler ou du moins de réduire à des valeurs très faibles, au moyen de correcteurs (tant aimants que fer doux), les cinq coefficients de la formule approchée de la déviation. Mais, bien que reposant au fond sur les mêmes principes fondamentaux que le compas de sir W. Thomson, il en diffère cependant d'une façon très notable par les dispositions instrumentales et surtout par la solution qu'il donne pour la correction de la déviation quadrantale. Il est donc nécessaire de donner ici les traits essentiels de cet appareil.

La déviation due à la bande se corrige au moyen d'un aimant vertical exactement comme dans tous les autres systèmes. La compensation de la déviation semi-circulaire s'obtient par une double opération. Dans la première, faite au point de départ, on détermine « l'angle tribord » (V. p. 158), et on annule, ou à très peu près, la déviation semi-circulaire, en plaçant sous la rose des aimants horizontaux, faisant avec la quille un angle égal à l'angle tribord, et placés sur un plateau de cuivre dont on peut faire varier la distance à la rose au moyen d'une vis. Quand, par suite du déplacement du navire, les variations des coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ viennent détruire l'exactitude de cette compensation, on la rétablit au moyen d'autres aimants horizontaux dont les uns sont parallèles, les autres perpendiculaires à la quille, et qui sont placés dans de petites caisses de cuivre qu'on peut rapprocher ou éloigner de la rose au moyen de vis situées à l'extérieur.

Afin de remédier aux variations de force produites par les changements de distance entre l'aiguille de la rose et les aimants correcteurs, M. Peichl, qui a accepté les longueurs ordinaires d'aiguilles (15 à 18 centim.), a pris en revanche des aimants fort courts, ayant 2 à 7 centimètres environ; il les a placés très près de la verticale passant par le centre de suspension de la rose; et les a disposés suivant une figure semblable à celle des aiguilles de la rose, grâce à ces différentes précautions, il a pu éviter les erreurs sextantales.

La partie vraiment originale de ce compas est celle qui se rapporte à la compensation de la déviation quadrantale. Sir W. Thomson l'a obtenue, nous l'avons vu plus haut, d'abord en diminuant la longueur des aiguilles, ensuite et surtout en diminuant leur moment magnétique pour empêcher toute influence réciproque des sphères et des aiguilles, en un mot, en diminuant la force directrice du compas, ce qui n'a d'ailleurs aucun inconvénient, puisque le poids de sa rose a été réduit en conséquence. M. Peichl, au contraire, accepte les longueurs ordinaires d'aiguilles, et, bien loin de diminuer la force directrice de ces dernières, il l'augmente au contraire en donnant à ses correcteurs de fer doux une disposition indiquée par la théorie, mais arrêtée définitivement par l'expérience de façon à empêcher les erreurs octantales, dues à l'influence réciproque des aiguilles et des correcteurs, de dépasser la faible valeur de 1 degré environ. Dans le compas de M. Peichl, la déviation quadrantale est corrigée par deux systèmes composés chacun de 32 tiges de fer doux, dont les axes sont situés dans deux plans parallèles entre eux et à celui de la rose, et dont les longueurs diffèrent de façon que les courbes qui réunissent les extrémités intérieures d'un même système de barreaux soient des ellipses, tandis que les extrémités extérieures forment des circonférences. A chaque tige de l'un des systèmes correspond une tige de l'autre système, et une transmission de mouvement convenable permet de faire varier l'angle formé par les tiges correspondantes. Si les tiges qui, dans chaque système, forment les grands axes égaux des deux ellipses, sont perpendiculaires l'une à l'autre, on voit, d'après ce que nous avons dit de l'influence des tiges a et e (v. Pl. 1), sur la valeur des coefficients $\mathfrak{D}$ et λ, que dans cette position les deux systèmes de tiges de fer doux ne corrigent aucune déviation quadrantale, puisque les paramètres a_1 et e_1 qu'ils introduisent, étant égaux, ne peuvent compenser l'inégalité des paramètres a et e dus au navire ; mais, en revanche, ils augmentent la force directrice moyenne, puisque ces deux paramètres a_1 et e_1, égaux en valeur absolue, sont tous deux positifs.

Au contraire, si on s'arrange de manière que les grands axes des deux ellipses fassent entre eux un certain angle, la considération des effets produits par les tiges a et e (v. p. 62) montre aisément que les deux systèmes de tiges donnent alors naissance à une force compensatrice ; cette force est proportionnelle au cosinus de l'angle fait par les grands axes des deux ellipses, et susceptible par suite de corriger la déviation quadrantale.

D'après les calculs et les expériences de M. Peichl, l'accroissement de force directrice peut aller jusqu'à 80 p. 100, quand les aiguilles de la rose sont situées au même niveau que les tiges de fer doux. Il n'est plus que de 60 p. 100, si, pour employer des roses de plus de 20 centim. de diamètre, on est obligé de les placer au-dessus de l'évidement intérieur formé par les tiges. On pourrait craindre que cette augmentation de force directrice ne fût très nuisible à la stabilité du compas; mais il faut remarquer que les aiguilles de la rose donnant à chacune des tiges de fer doux devant lesquelles elles passent un pôle de nom contraire au pôle inducteur, l'attraction qui s'exerce entre ces pôles allonge la durée de l'oscillation de l'aiguille, qui correspond ainsi, non pas à la force directrice réelle de l'aiguille, mais bien à une force directrice plus faible de 20 à 30 p. 100.

M. Peichl a établi deux types de correcteurs: le premier type possède une force suffisante pour corriger une déviation quadrantale égale ou inférieure à 10 degrés; le second peut corriger jusqu'à 15 degrés de la même déviation, et l'inventeur ne voit aucune difficulté à faire d'autres types plus puissants encore. Mais on aurait probablement alors à compter avec une déviation octantale; pour les types actuellement en usage, les dimensions définitives des barres ont été déterminées empiriquement d'une façon assez heureuse pour que cette déviation octantale soit à peine de 1 degré. Toutes les fois qu'elle dépasse cette valeur, on doit rebuter l'instrument. Mais il ne faut pas oublier que la force compensatrice des tiges de fer doux est due principalement à l'induction que l'aiguille exerce sur elles, induction qui donne une force à peu près constante. Au contraire, d'après ce que nous avons dit (p. 44), la déviation varie en raison inverse de la force horizontale terrestre au lieu où se trouve le bâtiment; il en résulte donc que la correction de la déviation quadrantale ne sera bonne que pour le lieu où elle aura été faite. Par exemple, si on a corrigé une déviation quadrantale donnée en Angleterre, elle reparaîtra, réduite à moitié environ à l'équateur magnétique, puisqu'en passant de l'un à l'autre lieu, la force terrestre qui s'oppose à la déviation de l'aiguille a doublé. On remédie aisément à cet inconvénient sans nouvelles observations, sans changements de route, au moyen d'une échelle spéciale qui permet de faire varier la force quadrantale de l'instrument proportionnellement au changement de force terrestre. Pour obvier aux perturbations que le roulis apporterait aux positions respectives de l'aiguille et des correcteurs, tout le système de ces derniers, sauf bien entendu la barre destinée à la correction de la déviation due à la bande, est placé avec la rose dans une même suspension à la Cardan, très soigneusement perfectionnée au moyen de ressorts en caoutchouc, et, de plus, M. Peichl a installé dans cette même suspension, au-dessous du centre de suspension de la rose, un barreau aimanté vertical, qui s'oppose aux oscillations de la rose.

Enfin le système de compensation s'adaptant parfaitement à un compas liquide breveté, construit par M. A. Gareis, il en résulte que l'appareil se trouve dans de bonnes conditions par rapport aux forces perturbatrices de toutes espèces mises en jeu par le roulis.

Expérimenté avec soin et à plusieurs reprises sur différents navires de la Marine Impériale et Royale Autrichienne, mis en service sur d'autres, cet appareil a donné des résultats tels qu'on en a rendu l'emploi réglementaire à bord des navires de guerre de cette nation.

Comparaison des compas de sir W. Thomson et de M. Peichl. — Si maintenant nous comparons les deux compas que nous venons de décrire, nous verrons que, fondés tous deux sur ce principe qu'on peut corriger successivement les diverses parties de la déviation sans qu'une correction altère l'efficacité des précédentes, ils diffèrent cependant d'une façon notable par les dispositions instrumentales destinées à réaliser ce principe dans la pratique.

Si la correction de la déviation due à la bande est exactement la même dans l'un et l'autre compas, il n'en est déjà plus de même pour la correction de la déviation demi-circulaire. Nous regrettons d'ailleurs de ne pas trouver dans le compas de M. Peichl de barre verticale de fer doux analogue à celle de Flinders, et il nous paraît à craindre que les longueurs et les forces directrices d'aiguilles qu'il admet, permettent difficilement l'introduction, avec avantage et sécurité, d'un pareil accessoire. Nous avons fait ressortir plus haut les divergences plus capitales encore qu'on observe dans la compensation de la déviation quadrantale. Quoi qu'il en soit, les marins, qui ont si longtemps et vainement demandé un compas à nulle ou faible déviation, se trouvent aujourd'hui en présence de deux solutions complètes et distinctes de cette question.

Si on exigeait de nous une conclusion personnelle, très délicate à formuler quand elle ne s'appuie pas sur des expériences comparatives longues et précises, nous dirions qu'à notre avis les deux compas sont excellents et incomparablement supérieurs à tous ceux qui ont été mis en usage jusqu'ici. Le compas de sir W Thomson nous paraît supérieur non pas seulement à cause de sa simplicité et de sa solidité, mais surtout à cause de sa rose qui permet de corriger la déviation quadrantale une fois pour toutes et d'employer la barre de Flinders qui, dans la très grande majorité des cas, rend également invariable la position des barreaux aimantés.

De l'ancien matériel de compas. — Mais nous ne pouvons oublier qu'il existe actuellement un matériel de compas considérable et coûteux, qu'on ne saurait mettre en bloc au rebut et dont la transformation graduelle exigera un temps plus ou moins considérable. Nous croyons qu'on tirerait de tous ces compas un meilleur parti, si on disposait leurs habitacles de façon à y loger les deux systèmes d'aimant compensateurs, tant transversaux que longitudinaux, bien entendu sous l'obligation expresse de maintenir entre ces aimants et l'aiguille de la rose la distance indiquée dans la première partie. Il faudrait pratiquer un assez grand nombre de logements pour pouvoir faire varier facilement la position de ces aimants.

Au départ, on déterminerait une fois pour toutes les valeurs des coefficients constants A, D, E et les faibles valeurs restant aux coefficients B et C après leur compensation. Et, à la mer, deux observations de variation faites de temps à autre à deux caps cardinaux suffiraient pour ajuster à nouveau les aimants compensateurs de façon que l'exactitude de la compensation de la déviation semi-circulaire soit maintenue. On n'aurait plus, dès lors, qu'à tenir compte des déviations constante et quadrantale dont le total serait donné par une table toujours la même, et le compas n'aurait, dans la plupart des cas, que des déviations inférieures à 8 degrés en valeur absolue, qui sont loin d'être aussi gênantes que celles qui dépassent 15 degrés.

Résumé de la quatrième partie.

Nous avons donné, dans cette partie, les règles de la compensation et montré qu'actuellement les compas de sir W. Thomson et de M. Peichl, permettent l'application complète de ces règles dans la pratique.

Nous n'avons pas besoin de faire ressortir encore l'avantage qu'il y a, soit de pouvoir réduire la partie de la déviation variable avec les cap à ne pas dépasser 2 degrés en valeur absolue, soit à pouvoir se servir de compas placés dans des tourelles et hors du plan longitudinal en n'ayant à compter qu'avec un coefficient constant un peu fort. Mais il faut se garder de toute illusion dangereuse sur la précision que l'on peut atteindre par des observations faites à bord, même quand elles sont conduites avec le plus grand soin. Les erreurs de tous ordres dont elles sont forcément entachées peuvent facilement donner 1 degré de différence entre la déviation donnée par la table formée au moyen des coefficients et celle qu'on déduit d'une observation directe de variation. Avec les moyens actuels d'observation, il est illusoire de compter sur une précision plus grande; la théorie des erreurs permet d'arriver facilement à cette conclusion.

On sait en effet (v. *Cours d'astronomie nautique* de M. Faye, p. 156) que, si on appelle U une fonction de quantités A, B, C, etc., telle en un mot que l'on ait $U = f(A, B, C...)$ et si les erreurs moyennes de ces diverses quantités sont respectivement da, db, dc etc., l'erreur moyenne, du, de la quantité U, est donnée par la formule :

$$du = +\sqrt{\left(\frac{df}{dA}\right)^2 da^2 + \left(\frac{df}{dB}\right)^2 db^2 + \left(\frac{df}{dC}\right) dc^2 + \ldots}$$

Si on applique la formule précédente à l'expression de δ, en fonction des cinq coefficients approchés, on aura, en supposant que les erreurs moyennes des divers coefficients soient toutes égales entre elles, à da, par exemple :

$$d\delta = \pm\sqrt{\overline{da}^2[1 + (\sin^2\zeta' + \cos^2\zeta') + (\sin^2 2\zeta' + \cos^2 2\zeta')]} = \pm da\sqrt{3} = \pm 1{,}7\, da.$$

Or les erreurs moyennes sur les coefficients, pour des observations bien faites, ne semblent pas devoir dépasser 30 minutes. L'erreur moyenne à craindre sur δ sera donc de 50 minutes, soit un degré en chiffre rond.

Telle est la précision sur laquelle on peut compter dans la pratique et qu'il ne semble pas possible de dépasser avec les procédés actuels d'observation; ainsi il ne faut pas compter que l'on réussira à annuler les cinq coefficients de la déviation, mais bien qu'ils auront en général de faibles valeurs comprises entre 0 et 1°, qu'on calculera au moyen des types donnés dans la seconde partie (p. 135).

En définitive la compensation consiste à transformer le champ magnétique variable où se meut la rose en un champ magnétique uniforme. Chaque compensateur faisant varier la force directrice de l'aiguille à un cap déterminé, modifie par cela même la déviation que lui imprimaient, à ce cap, les compensateurs précédemment placés. On voit ainsi qu'une compensation exacte ne peut s'obtenir que par des approximations successives. Mais la première est suffisante dans la très grande majorité des cas.

COMPENSATION APPROXIMATIVE

Sur tous les bâtiments n'ayant pas de grosses pièces d'artillerie ou des canots en fer par le travers du compas, voici comment il faut procéder.

1° Mettre les sphères perpendiculairement à la quille et corrigeant un D=2°

2° Si on n'a pas de déflecteur, se servir des relèvements pour placer les aimants convenables et rectifier leur position toutes les fois que l'on passe à un cap cardinal magnétique.

3° Rectifier la position des sphères au moyen des observations de déviation faites aux caps quadrantaux du compas.

Mais toutes les fois que l'on aura un déflecteur il est préférable, après avoir placé les sphères comme il est dit plus haut, de profiter du passage du bâtiment aux deux premiers caps cardinaux adjacents du compas pour placer les aimants correcteurs, convenables dans chaque cas, de manière à ramener la force directrice de l'aiguille aux 0,900 de ce qu'elle est à terre dans un lieu libre de fer.

Ceci fait, les déplacements que l'on aura à faire subir par les observations subséquentes soit de relèvements, soit d'écart normal, seront très faibles et la compensation définitive, obtenue par un tour complet d'horizon aux coffres ou en route libre, laissera des résidus d'erreurs beaucoup plus faibles.

4° Opérer la compensation de l'erreur de bande.

Quand on opère par relèvements, c'est-à-dire en annulant les déviations, les aimants correcteurs employés doivent être perpendiculaires à l'aiguille aimantée.

Quand on se sert du déflecteur, c'est-à-dire quand on modifie la force directrice, les aimants correcteurs, mis à un cap quelconque, doivent être parallèles à l'aiguille aimantée (V 5e partie).

Un seul cap magnétique permet de placer approximativement les deux systèmes d'aimants correcteurs quand on peut employer simultanément le déflecteur et les relèvements. Supposons par exemple que le bâtiment passe par le cap Nord magnétique. On mettra d'abord un ou plusieurs aimants transversaux de façon à annuler la déviation.

Ceci fait, on placera, comme il est dit dans la Cinquième partie, des aimants longitudinaux de façon à rendre la force directrice du compas égale aux 0,900 de ce qu'elle est à terre.

On doit procéder à la compensation approximative dès la fin de l'armement et mettre à profit pour cela le passage à chaque cap principal, magnétique ou du compas. En opérant ainsi, un seul tour d'horizon soit aux coffres, soit en route libre, lors des essais de machines, suffira toujours pour avoir une compensation définitive exacte à 1° ou 2° près à tous les caps.

CINQUIÈME PARTIE

RÉGULATION ET COMPENSATION DES COMPAS

QUAND ON NE PEUT AVOIR AUCUN RELÈVEMENT, NI TERRESTRE, NI CÉLESTE

Les Méthodes, soit de Régulation, soit de Compensation, que nous avons exposées jusqu'ici dans ce livre, exigent la connaissance des déviations, et par suite l'observation des variations à certains caps convenablement choisis. Pour les appliquer, il faut en un mot pouvoir obtenir, avec le compas, les relèvements d'astres ou d'objets terrestres, dont le relèvement vrai ou magnétique est connu.

En temps de brume, à la mer comme en rade, on ne pouvait donc régler ni compenser ses compas, jusqu'à ce que la théorie de Poisson, modifiée par Archibald Smith, ait montré que les déviations à tous les caps dépendaient de cinq coefficients, qu'on pouvait obtenir non seulement au moyen des valeurs numériques des déviations observées, mais encore au moyen des rapports des forces directrices qui orientent l'aiguille aux différents caps.

CHAPITRE PREMIER

PRINCIPE DE LA COMPENSATION DU COMPAS AU MOYEN DU DÉFLECTEUR DE SIR WILLIAM THOMSON

Nous avons donné dans l'*Introduction* p. (37), le principe et la description de cet instrument; mais la figure trop succincte n'indique malheureusement pas qu'on peut lire très exactement l'écartement des aimants, au moyen d'un tambour divisé de grand diamètre, semblable à celui que portent les microscopes des grands instruments d'Astronomie.

La compensation du compas au moyen de cet appareil repose sur les deux principes suivants :

1° Si la force directrice qui oriente l'aiguille du compas, à bord, est la même, en grandeur et en direction, à cinq caps différents, elle sera constante à tous les caps, et égale à cette même valeur;

2° Si la force directrice qui oriente le compas, à bord, est constante, en grandeur et en direction, à tous les caps, la déviation est constante, égale au coefficient A, et par suite les indications du compas sont toujours correctes.

Pour démontrer ces deux propositions, prenons les deux équations (37) et (38) de la troisième partie et mettons-les sous la forme :

$$(70) \quad X' = H \{ (1+a)\cos\zeta - b\sin\zeta \} + cZ + P.$$
$$(71) \quad Y' = H \{ d\cos\zeta - (1+e)\sin\zeta \} + fZ + Q.$$

En élevant chacune de ces équations au carré et en les additionnant, nous formerons le carré de la force directrice qui oriente l'aiguille, soit R^2 Dans l'expression de ce carré, donnons à ζ cinq valeurs successives, que nous choisirons de manière à simplifier les calculs.

$\zeta = 0$ nous donnera l'expression du carré de la force R_0, qui oriente l'aiguille quand le cap est au Nord magnétique; de même :

$\zeta = 90°$ donnera la force direct. R_8 qui convient au cap magnét. E.,
$\zeta = 180°$ — — R_{16} — — — S.,
$\zeta = 270°$ — — R_{24} — — — O.,
Enfin :
$\zeta = 45°$ — — R_4 — — — N.E.

Nous n'écrirons pas ces cinq développements, qui n'offrent aucune difficulté, et dont l'écriture seule est compliquée.

Cela posé, égalons d'une part R^2_0 et R^2_{18}, et de l'autre R^2_8 et R^2_{24}, et nous verrons que ces égalités ne peuvent être satisfaites simultanément, que si on a ensemble :

$$cZ + P = 0, \text{ c'est-à-dire } \mathfrak{B} = 0,$$

et :

$$fZ + Q = 0, \text{ c'est-à-dire } \mathfrak{C} = 0,$$

puisque ces deux coefficients, quand on y remplace tang θ par $\frac{Z}{H}$, prennent respectivement les formes. $\frac{1}{\lambda}(cZ + P)$ et $\frac{1}{\lambda}(fZ + Q)$.

Égalons ensuite R^2_0 avec R^2_8, et nous verrons que cette égalité sera satisfaite si $a = e$, c'est-à-dire si $\mathfrak{D} = 0$.

Ces égalités étant satisfaites, égalons enfin les expressions nouvelles et simplifiées de R^2_0 et R^2_4, et nous verrons que cette dernière égalité ne peut être satisfaite que si on a :

$$b = d = 0, \text{ c'est-à-dire } \mathfrak{E} = 0.$$

En somme, si nous avons :

$$R_0 = R_4 = R_8 = R_{16} = R_{24}$$

les quatre coefficients $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$ sont nuls, et il résulte des équations donnant R ou H', force directrice de l'aiguille à bord, que l'on a à tous les caps, $H' = \lambda H$, ce qui vérifie la première proposition.

Enfin le coefficient $\mathfrak{A}$, en tant qu'il provient seulement des erreurs d'observation, subsiste seul; donc la formule simplifiée de la déviation devient :

$$\delta = A,$$

ce qui justifie notre seconde proposition.

Ainsi on pourra compenser un compas sans prendre aucun relèvement, à condition que l'on ait : 1° un instrument commode pour mesurer d'une façon suffisamment approchée la force directrice de l'aiguille à un cap déterminé; puis, 2° des compensateurs, aimants et fer doux, qui permettent d'augmenter ou de diminuer de quantités convenables les forces observées aux cinq caps choisis.

Cette méthode peut s'appliquer à bien des compas; mais il convient de dire qu'elle ne donne aisément de résultats, d'une exactitude suffisante pour la pratique, que si la rose est suffisamment légère, et qu'elle ne devient simple, rapide et commode, en un mot pratique que si la rose a un assez faible moment magnétique pour qu'on puisse se servir, pour la mesure des forces directrices à différents caps, du déflecteur de sir W. Thompson. Nous exposerons l'application de la méthode à un compas Thomson, pour tout autre les opérations ne différeraient que par des détails secondaires tenant à la construction et aux dispositions particulières de l'habitacle.

Tâtonnements et complications dans la pratique. — Nous devrions égaliser les forces directrices aux quatre caps cardinaux magnétiques, c'est-à-dire à quatre caps, deux à deux diamétralement opposés dans l'espace. Nous sommes obligés de nous servir des caps au compas, et de les ramener à coïncider avec les caps magnétiques au moyen des correcteurs. Il est bien évident que cette opération sera d'autant plus rapide que les déviations primitives du compas sont plus faibles en valeur absolue, c'est-à-dire que les variations de la force directrice autour de la valeur moyenne sont plus petites. Comme en général, pour la très grande majorité des navires, l'expérience a appris que cette force directrice moyenne était égale à 0,900, on diminuera les tâtonnements en ramenant de suite, à cette valeur, au moyen des aimants correcteurs, la force directrice observée aux deux premiers caps cardinaux du compas. De cette façon on restreint à coup sûr l'amplitude des variations de la force directrice et on peut arriver, dans la très grande majorité des cas, à faire la compensation au moyen d'un seul tour d'horizon. Sauf dans les cas absolument exceptionnels de navires de guerre d'une construction spéciale et de compas placés hors du plan longitudinal, deux tours suffiront à réduire les déviations à 2 ou 3 degrés en valeur absolue.

Dans les cas extrêmement rares dont nous parlons, on pourra même recueillir dans ce deuxième tour d'horizon les données nécessaires pour le déplacement des correcteurs et pour l'orientation de la ligne des sphères, de telle sorte que le troisième et dernier tour d'horizon ne sera pour ainsi dire qu'une vérification.

Théoriquement la déviation d'un compas ainsi compensé devrait être constante à tous les caps, mais il faut compter avec les erreurs d'observation de toutes sortes inévitables dans la pratique, aussi la déviation variera-t-elle avec le cap, mais la compensation aura eu pour effet de la réduire à de faibles valeurs absolues ne dépassant pas trois degrés en général, résultat bien suffisant pour assurer la sécurité de la route et lui donner une exactitude bien supérieure à celle qu'il est possible d'atteindre aujourd'hui en temps de brume surtout à bord d'un navire neuf.

Modification de la force directrice. — Nous avons dit, page 38, comment, à un cap donné, la lecture du déflecteur qui correspond à un écart de 90° imprimé à la rose peut servir de mesure à la force directrice du compas à ce cap. Nous appellerons dorénavant cette déviation de 90° *écart normal.*

Il nous reste à montrer comment on peut, au moyen des correcteurs, aimants et fers doux, augmenter ou diminuer convenablement cette lecture, c'est-à-dire la force directrice.

MODIFICATION DE LA LECTURE AU MOYEN DES AIMANTS

RÈGLES PRATIQUES

La *direction* des aimants correcteurs à employer est donnée sans ambiguité par la direction qu'occupe le pointeur dans la position d'écart normal.

(Nous supposons, en parlant ainsi, qu'il est sur l'E. et non sur l'Eα. N. de la rose déviée.)

L'*orientation* des aimants correcteurs, quand on veut diminuer la lecture, doit être telle, que leurs couleurs soient orientées comme celles des aimants du déflecteur quand ce dernier est dans la position d'écart normal.

Au contraire, quand on veut augmenter la lecture, les couleurs des aimants compensateurs doivent être orientées en sens inverse de celles des aimants du déflecteur dans la position d'écart normal.

Nous dirons pour abréger :

Quand il n'y a pas encore d'aimants correcteurs convenables, on diminue la lecture d'écart normal en les mettant en place, de façon que leurs couleurs soient mariées avec celles du déflecteur; au contraire, on augmente la lecture, en contrariant leurs couleurs avec celles du déflecteur.

Quand il y a déjà des aimants en place, deux cas peuvent se présenter :

1° Les aimants correcteurs déjà en place ont leurs couleurs *mariées* avec celles du déflecteur dans la position d'écart normal; dans ce cas, si on veut augmenter la lecture du déflecteur, il faut éloigner les aimants correcteurs.

Si on veut diminuer la lecture du déflecteur, il faut approcher les aimants.

2° Les aimants correcteurs déjà en place ont leurs couleurs contrariées avec celles du déflecteur dans la position d'écart normal.

Dans ce cas, si on veut augmenter la lecture, il faut approcher les aimants correcteurs.

Si on veut diminuer la lecture, il faut éloigner les aimants.

MODIFICATION DE LA LECTURE AU MOYEN DES SPHÈRES

RÈGLES PRATIQUES

Augmenter la lecture au moyen des sphères. — *S'il n'y a pas encore de sphères en place*, on doit les mettre, de part et d'autre de la rose, à égale distance du centre du compas et de telle façon que la ligne qui joint leurs centres soit parallèle à la direction occupée par le pointeur dans la position d'écart normal qui correspond au cap d'observation.

S'il y a déjà des sphères en place et que la ligne de leurs centres soit parallèle à cette direction du pointeur, on devra les approcher ou en prendre de plus grosses.

S'il y a déjà des sphères en place, et que la ligne de leurs centres soit perpendiculaire à cette direction du pointeur, on devra les éloigner ou en prendre de plus petites.

Diminuer la lecture au moyen des sphères. — *S'il n'y a pas encore de sphères en place*, disposez-les de façon que la ligne de leurs centres soit perpendiculaire à la direction occupée par le pointeur dans la position d'écart normal qui correspond à ce cap.

S'il y a déjà des sphères et que la ligne de leurs centres soit perpendiculaire à cette direction du pointeur, on devra les approcher ou en prendre de plus grosses.

S'il y a déjà des sphères et que la ligne de leurs centres soit parallèle à la direction du pointeur dans la position d'écart normal, on devra les éloigner ou en prendre de plus petites.

Des tâtonnements. — La pratique seule diminue la longueur des tâtonnements inévitables en apprenant à quelle distance approximative il faut présenter les aimants ou les sphères, la plus ou moins grande rapidité avec laquelle on doit faire varier leur distance à la rose.

On abrège notablement ces tâtonnements, quand on sait le nombre de degrés de déviation qu'imprime, à l'aiguille aimantée, soit une paire de sphères égales, soit un aimant quand la ligne des centres ou la longueur sont perpendiculaires à la direction de l'aimant.

Pour les sphères, le tableau donne le nombre pour tous les lieux du globe.

Pour les aimants, on peut aisément numéroter leurs divers logements, comme nous l'avons dit (chapitre V, 4[e] partie).

Ceci étant, on voit, par les formules de la page 256 *a*, qu'un aimant orienté parallèlement à l'aiguille, mais en sens inverse, augmente approximativement la force directrice de l'aiguille d'une fraction de sa valeur donnée par le sinus naturel de la déviation produite par ce même aimant quand son centre restant à la même distance de l'aiguille, on le place perpendiculairement à la direction initiale de celle-ci. Il diminue cette force de la même fraction de sa valeur, quand il est orienté parallèlement et dans le même sens que l'aiguille.

Pour les sphères il y a deux cas à distinguer :

1° Quand on les place perpendiculairement à la position initiale de l'aiguille, c'est-à-dire perpendiculairement à la direction du pointeur dans la position d'écart normal, elles diminuent la force directrice d'une fraction de sa valeur représentée par le sinus naturel de la déviation quadrantale qu'elles corrigent;

2° Quand on les place parallèlement à l'aiguille, elles augmentent la force directrice de celle-ci d'une fraction de sa valeur égale au double de la quantité précédente.

Exemple. — Soit H' la force horizontale à terre, λ H' la force directrice à bord. Ayant obtenu l'écart normal à bord avec la lecture 6, on veut l'obtenir avec la lecture 10, au même cap Nord du compas, dans quel logement faut-il placer les aimants longitudinaux, orientés en sens inverse de l'aiguille? Le tableau de graduation du déflecteur donné plus loin montre qu'on doit faire varier la force directrice de l'aiguille de 1,08 — 0,94 de sa valeur, soit 0,14. Donc, il faut placer des aimants longitudinaux dans les logements où, perpendiculaires à l'aiguille, ils lui imprimeraient une déviation dont le sinus naturel égale 0,14, c'est-à-dire une déviation de 8°.

Pour effectuer, en quarante minutes environ, une compensation complète au moyen de déflecteur, il suffit d'avoir fait, une fois pour toutes avec le déflecteur, quelques exercices préliminaires dont la durée totale ne dépasse certainement pas deux heures.

Ils consistent à s'habituer, avec cet appareil, à obtenir l'écart normal, puis à remettre, le plus rapidement possible, la rose dans sa position initiale d'équilibre, à faire varier la lecture du déflecteur au moyen des aimants et des sphères, enfin à graduer le déflecteur comme nous allons le dire.

CHAPITRE II

GRADUATION DE L'ÉCHELLE DU DÉFLECTEUR ET EMPLOI DE CET INSTRUMENT

Recommandations pratiques sur l'emploi du déflecteur. — Sir William Thomson recommande, quand on se sert de cet instrument, de toujours produire une déflexion de 90 degrés. C'est, en effet, le moyen de réduire au minimum les erreurs d'observation. En admettant, en effet, que le cap ait changé de 3 à 4 degrés pendant l'observation, par suite d'une erreur quelconque, d'une petite embardée, les forces déviatrices sont entre elles comme :

$$\frac{\sin 86^\circ}{\sin 90^\circ} \text{ c'est-à-dire } \frac{1000}{997},$$

On voit que l'erreur sera insignifiante.

Il recommande également de mettre le pointeur sur une division telle, que le déflecteur soit un peu trop fort quand le pointeur est sur l'Est de la rose déviée, et un peu trop faible quand on le met sur l'Est 1/4 Nord. On est sûr alors d'avoir une valeur exacte de la force déviatrice, puisqu'elle est ainsi comprise entre deux limites fort rapprochées.

Voici la meilleure manière d'opérer pour faire rapidement une observation, et ici, nous suivons presque textuellement la brochure de sir W. Thomson.

On place le pivot central du déflecteur dans le trou conique qui se trouve sur la glace du compas. On prend alors le pointeur de la main droite et on le porte sur l'Est ou sur l'Ouest du compas. Supposons, pour fixer les idées, que ce soit sur l'Est. La pointe N. de la rose suit rapidement le pointeur du déflecteur; la rapidité même de sa marche indique si on peut compter que le déflecteur ait une force suffisante pour produire la déflexion demandée, soit 90 degrés. Si donc la pointe Nord suit rapidement le pointeur, comme il est essentiel pour la brièveté de l'observation que la déflexion de 90 degrés ne soit pas dépassée, dès que la pointe Nord de la rose aura été déviée de sa position première de 50 à 60 degrés, on portera aussi vite que possible le pointeur (qui est actuellement sur l'Est de la rose) sur le point Ouest de cette rose, en passant par le Nord, et on le gardera sur le point Ouest jusqu'à ce que la rose soit presque en repos, près de la position qu'elle doit occuper pour avoir la déflexion exigée.

Alors, ramener rapidement le pointeur au-dessus d'une division quelconque comprise entre le Nord et l'Est-quart-Nord et le maintenir là jusqu'à ce que la rose soit presque en repos, à la déflexion désirée.

Si le déflecteur n'était pas assez fort pour qne ce résultat fût obtenu, il faudrait tourner rapidement la vis de façon à augmenter l'écartement et à tenir la rose sous le commandement du déflecteur. Cela fait, on approche graduellement le pointeur de l'Est de la rose déviée, en ayant soin de diminuer graduellement aussi la force du déflecteur, en tournant la vis de manière à diminuer l'écartement des aimants.

Ces deux mouvements doivent s'opérer simultanément, de façon que le pointeur soit exactement sur l'Est-quart-Nord, quand la rose aura atteint une déflexion comprise entre 85 et 90 degrés.

Si, à la fin de l'opération, on désire prendre rapidement le cap du navire avec cette même rose de façon à s'assurer qu'il n'a pas sensiblement varié pendant l'observation, il convient de se servir du déflecteur pour arrêter les oscillations de la rose et la replacer dans sa position initiale.

Quelques essais suffiront pour se rendre maître du maniement du déflecteur, et un observateur pourra après trois ou quatre essais remettre la rose à sa position initiale en un quart de minute environ, quoique la période d'oscillation soit de 40 à 50 secondes. Il suffira, pour cela, de s'exercer à manier le pointeur avec une très grande rapidité, en imitant la manœuvre qu'on fait lorsqu'il s'agit d'accoster une jetée avec un canot à vapeur, et qui consiste à passer rapidement et alternativement de la toute vitesse en avant à la toute vitesse en arrière.

A cet effet, on met la cuve et la rose du compas à terre et on manœuvre la vis du déflecteur de manière que, le pointeur étant au-dessus du point E. q. N. de la rose *déviée*, la rose soit écartée de 90 degrés à compter de sa position naturelle d'équilibre.

On lit et on note la division marquée par l'index sur l'échelle du déflecteur, et on sait alors que dans cette position la force déviatrice de l'instrument fait équilibre, et, par suite, est égale à la force horizontale terrestre au lieu où l'on se trouve. Si donc nous prenons cette dernière pour unité, la division considérée du déflecteur correspondra à une force perturbatrice 1.

Pour obtenir les valeurs des divisions de l'échelle qui se trouvent de part et d'autre de ce point de départ, on opère d'une façon différente, suivant que la division considérée est numériquement plus faible ou plus forte que celle qui correspond à la force 1.

Supposons donc que nous voulions trouver les forces magnétiques qui correspondent aux divisions numériquement plus faibles, c'est-à-dire à celles qui indiquent des écarts des branches du déflecteur moindres que l'écart correspondant à la force perturbatrice 1, et que nous appellerons écart normal.

On met l'index sur une de ces divisions, soit p, par exemple, puis on place le pointeur sur la ligne Eq. N. du compas que l'on suit avec le pointeur à mesure que la rose se déplace sous l'influence du déflecteur; quand la rose est arrivée à sa position d'équilibre, on lit l'écart α qui existe entre cette nouvelle position d'équilibre et celle que la rose occupait primitivement sous la seule action terrestre, et on sait alors (voyez p. 36), que la division p correspond à une force magnétique égale à H sin α ou à sin α, puisque nous prenons H pour unité.

Si, au contraire, on veut graduer la partie de l'échelle qui correspond à des écarts des aimants plus grands que l'écart normal, c'est-à-dire à des forces magnétiques plus fortes que celles de la terre, on s'appuie sur ce que, une rose étant donnée, les forces magnétiques variables, qui produisent un même écart de 90 degrés, sont inversement proportionnelles au sinus de l'angle que le pointeur du déflecteur fait avec la ligne N.-S. de la rose déviée, quand celle-ci est en équilibre sous l'action de la terre et de la force perturbatrice (voyez p. 36).

Par conséquent, pour avoir la force magnétique qui correspond à une telle division, soit m, par exemple, on mettra l'index sur cette division; puis, on cherchera sur quelle division de la rose déviée, située entre le Nord et l'Est, il faut mettre le pointeur pour que la rose reste en équilibre quand elle a été déviée de 90 degrés.

A ce moment, soit β l'angle du pointeur avec la nouvelle position de la ligne N.-S. de la rose, F la force perturbatrice de l'aiguille, on aura évidemment :

$$F \sin\beta = H \quad \text{d'où } F = \frac{H}{\sin\beta} \quad \text{ou } \frac{1}{\sin\beta},$$

d'après notre convention.

On réunira ainsi, dans une table, les valeurs des forces déviatrices qui correspondent à chacune des divisions de l'échelle, dans un lieu où la force terrestre horizontale est H.

Cette table ne pourra évidemment servir que pour le lieu où elle a été faite, mais, une fois qu'elle aura été dressée, on obtiendra facilement celle qui correspondra à un endroit quelconque de la terre où la force horizontale aura une valeur H_1, par exemple. Pour avoir dans ce cas les nouvelles valeurs des divisions de l'échelle en parties de H_1, il suffira évidemment de multiplier les valeurs obtenues précédemment au lieu H par le rapport inverse des unités choisies, soit $\frac{H}{H_1}$.

La graduation du déflecteur est rigoureusement exacte quand le pointeur est sur l'E. q N. de la rose déviée. Quand pour les lectures supérieures à celle qui correspond à la force directrice à terre, il faut incliner davantage le pointeur sur la ligne Nord-Sud de la rose déviée, la graduation n'est plus qu'approximative. Son exactitude est d'autant plus grande que l'angle β est plus grand, elle est tout à fait suffisante pour les besoins de la pratique si celui-ci ne descend pas au-dessous de 55° à 60°.

Dans un port ou H = 1,23, on a obtenu le tableau suivant :

I DIVISIONS de L'ÉCHELLE	II ÉCARTS OBSERVÉS	III FORCES mesurées avec H au lieu de départ POUR UNITÉ	IV FORCES mesurées avec l'unité de la carte Pl. II.
0	39	0.62	0.76
2	43	0.68	0.83
4	47	0.73	0.89
6	51	0.77	0.94
8	56	0.83	1.02
10	62	0.88	1.08
13	67.5	0.92	1.13
14	76.5	0.97	1.19
15.2	90	1 »	1.23
17	pointeur 76	$\frac{1}{\text{sinus}}$ 1.03	1.26
20	66.5	1.09	1.34
23	61	1.14	1.40
27	58	1.18	1.45
31	56	1.21	1.49
35	55	1.22	1.50

Cette graduation ne convient que pour l'instrument et le compas particuliers avec lesquels on peut se considérer comme suffisamment exercé quand, sans plusieurs déterminations successives de la valeur d'une division, faites avec un compas *en bon état*, on ne trouve pas entre les nombres extrêmes une différence plus grande que 0,015.

Pour rectifier les erreurs inévitables d'observation quand elles sont faibles et les trouver plus vite quand elles sont notables, il est bon de construire une courbe rassemblant toutes les observations.

N. B. — Comme, avec le temps, l'intensité magnétique des aimants du déflecteur et celle des aiguilles de la rose peut varier, il faut de temps à autre vérifier la graduation. Trois observations suffisent pour cela, dans un lieu quelconque, quand on a les nombres de la colonne IV. La durée d'oscillation de la rose indique si son moment magnétique a varié et dans quelle proportion.

Avantages de la graduation du déflecteur. — La graduation du déflecteur a des avantages nombreux : 1° elle donne immédiatement, en parties de la force terrestre, le calcul de la force directrice constante (ou à très peu près) qui, après la compensation, oriente le compas à bord ; 2° elle permet le calcul suffisamment exact des valeurs des différents coefficients de la déviation qui subsiste après une compensation imparfaite, c'est-à-dire qu'elle permet d'obtenir la table des déviations à tous les caps, en un mot de faire la régulation du compas, comme nous le montrerons tout à l'heure ; 3° dans les cas exceptionnels où le coefficient E (de la dév. quad.) a une valeur supérieure à 2°, elle permet le calcul, puis la compensation de ce coefficient, d'une manière suffisamment exacte pour ne lui laisser qu'une valeur comparable à celle des résidus laissés par la compensation aux valeurs des autres coefficients ; 4° elle donne tous les éléments de la compensation de la partie la plus importante de l'erreur due à la bande, et cela pour toutes les régions du globe ; 5° enfin, elle simplifie notablement le contrôle de la compensation du compas en temps de brume.

Examen préalable du déflecteur.

Emploi de la vis de hauteur et des aimants additionnels. — Le déflecteur est destiné à mesurer les forces directrices de part et d'autre de leur valeur moyenne. Si on observe que la force directrice moyenne à bord est, pour la grande majorité des navires, égale à environ 0,900 de la force à terre, si on remarque de plus la façon dont croît la force du déflecteur avec les divisions de l'échelle, on voit que le déflecteur se trouvera dans les meilleures conditions d'observation quand, dans un lieu donné, à terre, la lecture qui correspond à l'écart normal est égale ou très peu inférieure à la division moyenne de l'échelle, dans notre cas, par exemple, comprise entre 15 et 17.

Sur les côtes d'Europe, on arrive à ce résultat en modifiant au moyen de vis la hauteur du déflecteur au-dessus du plan de la rose, en l'élevant quand il est trop fort, en l'abaissant quand il est trop faible.

Dans les régions du globe où la force horizontale terrestre est très différente de ce qu'elle est en Europe, cette modification de la hauteur ne suffit pas, on a recours alors à de petits aimants additionnels qui augmentent ou diminuent, d'une quantité constante, la force du déflecteur suivant que leurs couleurs sont mariées ou contrariées avec celles des aimants du déflecteur.

La seule observation d'écart normal faite avec chacun de ses aimants suffit donc à faire connaître les nombres constants qu'il faut ajouter à chacun des nombres de la 3e colonne et de la 4e colonne pour avoir la force de chaque division du déflecteur dans le cas correspondant.

Il sera de même utile de savoir comment varient les nombres de la troisième colonne quand on élève le déflecteur d'une quantité donnée. Et pour cela il suffira de faire l'observation d'écart normal correspondante à la position la plus basse, à la position moyenne et à l'élévation la plus considérable que puisse prendre le déflecteur. On pourra, par interpolation, trouver les résultats correspondants à toute autre hauteur quelconque.

Les forces horizontales dans les parages ordinaires de la navigation varient entre 0,5 et 2,3 comme la carte le montre. Par conséquent il suffira qu'on puisse diminuer les nombres compris dans la quatrième colonne de $0,9 \times 0,5$ soit 0,45, et les augmenter de $2,3 \times 0,9$ soit 2,1 environ. La variation de hauteur suffit à atteindre le premier résultat qu'on obtiendrait encore en plaçant le pointeur, dans toutes les observations d'écart normal, non plus sur l'Eq. N mais sur le N E de la rose déviée de 90°.

Une force convenable et des aimants additionnels bien choisis permettent d'atteindre le second, on pourrait à la rigueur s'en passer. Il suffirait pour cela de prendre pour écart constant de la rose à tous les caps non plus l'angle de 90° mais bien celui de 30° La force qui correspond à ce second écart étant exactement la moitié de celle qui correspond au premier. On voit que le déflecteur pourrait ainsi mesurer des forces directrices doubles. Mais nous ne conseillerons jamais d'adopter cette solution pourtant très simple, à moins qu'on ne soit très exercé à manier le déflecteur. Voici pourquoi les erreurs qu'on commet dans les observations sont proportionnelles aux variations du sinus de l'angle d'écart. Quand on prend pour angle d'écart normal celui de 90°, il faut commettre une erreur totale de 8° dans l'évaluation du cap et de l'écart pour commettre une erreur de 1 centième de la force directrice, erreur qui correspond à une déviation de 30′ seulement. En choisissant l'angle de 30° au contraire, un seul degré d'erreur dans l'observation du cap et de l'écart donne une erreur double de la précédente soit de 1°. Dans notre guide pratique de la compensation sans relèvements nous avions indiqué trois perfectionnements secondaires dont le déflecteur de sir W. Thomson nous paraissait susceptible. M. Carpentier les a réalisés dans un modèle qui me paraît remplir toutes les conditions d'une pratique rapide et exacte.

On rendra de même toute compensation par le déflecteur beaucoup plus facile et rapide, si, dans les deux premiers caps cardinaux courus, on ramène au moyen d'aimants convenables la lecture du déflecteur à être de suite égale à la division qui correspond aux 0,900 de la force horizontale à terre.

CHAPITRE III

PRATIQUE DE LA COMPENSATION SANS RELÈVEMENTS

Avant tout, observer les diverses prescriptions faites au commencement de la deuxième partie, et ne jamais tenir pour exacte et définitive une compensation qui aurait été faite immédiatement après la sortie du bassin ou du port, ou d'un poste d'amarrage à cap fixe ou à très peu près; à un cap quelconque ne faire la lecture définitive correspondante à l'écart normal qu'au bout de quatre à cinq minutes.

Observations préliminaires à faire à terre.

1° Graduer le déflecteur;

2° Observer et noter le bras de levier du contrepoids qui, à terre, rend l'aiguille d'inclinaison horizontale : une demi-heure, au plus, suffit pour ces deux opérations.

Observations à bord. — Toutes les fois que cela sera possible, dans le port ou en rade, on procédera à une compensation approximative du compas.

Compensation approximative avec un déflecteur gradué. Pour cela, quand le bâtiment passe par un cap quelconque voisin de 15° au plus d'un cap cardinal du compas, on met, à ce cap, des aimants correcteurs de façon à ramener la lecture d'écart normal à la division correspondante au nombre 0,900 de la 3e colonne.

A un cap cardinal adjacent à celui-ci (toujours à 15° près, si les circonstances ne permettent pas d'avoir le cap exact), on place les aimants correcteurs de façon à obtenir l'écart normal avec cette même division.

Supposons que les deux premiers caps cardinaux aient été ainsi le Nord et l'Est du compas, et que la lecture commence à ces deux caps, grâce aux aimants, soit 12.

On tâchera de faire une lecture au cap Sud, soit 15; une autre, au cap Ouest, soit 8. Supposons qu'on soit à ce dernier cap.

La lecture moyenne, au Nord et au Sud, est 13,5.

La lecture moyenne, à l'Est et à l'Ouest, est 10.

La lecture moyenne entre ces deux-là, est 11,7. On placera, au cap Ouest, les sphères de façon à avoir l'écart normal avec cette division. Puis, toujours, au cap Ouest et après avoir mis la balance d'inclinaison au lieu et place des aiguilles, comme nous l'avons indiqué dans la quatrième partie, on rendra l'aiguille horizontale après avoir placé le contrepoids de papier à une distance de l'axe égale à $0,900 \times a$, a étant le bras du levier donné à terre.

Ceci fait, un seul tour d'horizon permettra dans la très grande majorité des cas d'obtenir une compensation exacte et définitive quand le compas est placé dans le plan médian du navire et dans le tiers central environ de sa longueur.

COMPENSATION DÉFINITIVE

Au moyen d'un tour d'horizon, du compas ou du déflecteur. Une observation de lecture n'est valable que si le bâtiment a gardé le même cap pendant l'observation, tout au moins à 4 ou 5° près. S'il en est autrement, il faut la recommencer.

Mise en place des aimants. (Voyez les règles pratiques données plus haut.)

Cap au Nord du compas. — Faites l'observation d'écart normal, soit 20,2 la lecture correspondante. Placez des aimants correcteurs longitudinaux orientés comme ceux du déflecteur, de façon à ramener la lecture à la division 12 qui correspond aux 0,9 de la force directrice du compas à terre. Remettez la rose au cap initial avec le déflecteur, puis enlevez ce dernier à une distance suffisante pour qu'il ne puisse agir sur la rose et assurez-vous que le navire a bien gardé le même cap pendant l'observation à 4 ou 5° près tout au moins.

Cap à l'Est du compas. — Faites l'observation d'écart normal, soit 8 la lecture correspondante. Au moyen des aimants correcteurs orientés en sens inverse de ceux du déflecteur, ramenez la lecture à être égale à 12. Remettez la rose au cap initial, etc.

Cap au Sud du compas. — Faites l'observation d'écart normal, soit 15 la lecture correspondante. Déplacez les aimants correcteurs de façon à obtenir, pour ce même écart, la lecture 13,5 moyenne des lectures faites au cap Nord et au cap Sud. Remettez la rose au cap initial, etc. Faites alors une seconde observation d'écart normal pour vous assurer de l'exactitude de la position des aimants. Modifiez cette position s'il y a lieu. Puis notez-la.

Cap à l'Ouest. — Faites l'observation d'écart normal, soit 5,6 la lecture correspondante. Déplacez les aimants correcteurs de façon à obtenir, pour ce même écart, la lecture 8,8, moyenne des lectures faites à l'Est, puis à l'Ouest.

Remettez la rose au cap initial. Enlevez le déflecteur, assurez-vous que le cap Ouest a été gardé à 4 ou 5° près tout au moins.

Faites une seconde observation d'écart normal pour vous assurer de l'exactitude de la position des aimants. Modifiez cette position s'il y a lieu, puis notez-la.

Mise en place des sphères. — La moyenne des lectures au Nord et au Sud est 13,5. Celle des lectures faites à l'Est et à l'Ouest est 8,8. Au moyen de l'index et du tambour, placez l'index sur la division 11,15 moyenne de ces deux lectures et mettez les sphères de façon à obtenir l'écart normal avec cette division. Comme elles doivent augmenter la lecture, il faudra que la ligne de leurs centres coïncide avec la direction du pointeur. Fixez les sphères à la distance convenable.

Remettez la rose au cap initial. Faites une seconde position d'écart normal pour vous assurer de l'exactitude de la position des sphères. Modifiez cette position s'il y a lieu. Puis notez-la.

Avant de quitter le cap Ouest, il faut faire, avec la balance d'inclinaison, comme il est dit dans la quatrième partie, (p.), les opérations de *compensation pour la bande.*

Vérification de la compensation. Limite de tolérance pour l'égalité des lectures. — Mettez successivement le cap du navire au SO, NO, N et NE du compas; à chacun de ces caps, notez la lecture correspondant à l'écart normal.

La compensation sera faite d'autant plus exactement que les cinq lectures ainsi faites seront plus près d'être égales entre elles; on pourra la considérer comme suffisante quand les forces directrices correspondantes, données par la colonne III du tableau p. 251 ne diffèreront pas de plus de 0,017. Ce sera le cas général.

Quand les différences seront plus accusées, on continuera le second tour d'horizon, en observant à chaque cap quadrantal et cardinal du compas la lecture correspondante à l'écart normal.

Les lectures d'écart normal donnent les forces directrices aux différents caps.

Désignons par F*n*, F*ne*, F*e*, etc., les forces directrices respectives au Nord, Nord-Est, Est, etc.

Cherchons les angles tels que

$$\text{Sin B} = \frac{Fn - Fs}{Fn + Fs} \qquad \text{Sin C} = \frac{Fo - Fe}{Fo + Fe}$$

$$\text{Sin D}' = \frac{Fn + Fs - (Fe + Fo)}{Fn + Fs + Fe + Fo} \qquad \text{Sin E} = \frac{Fse + Fno - (Fne + Fso)}{Fse + Fno + Fne + Fso}$$

Nous obtenons ainsi les coefficients approchés de la déviation.

Les aimants longitudinaux sont placés d'autant plus correctement que la valeur de B est plus faible. De même pour les aimants transversaux et la valeur de C.

Au besoin, si on ne veut pas toucher les correcteurs, on peut se contenter d'établir une courbe et une table de déviation avec ces diverses valeurs.

Avec ce que nous avons dit précédemment sur l'utilité de l'échelle graduée des logements, on pourra, si les valeurs de B et C dépassent 1°30, les ramener à une valeur inférieure en déplaçant convenablement les aimants correcteurs de chaque groupe.

Déplacement des sphères. — Prenez dans la table la valeur de D qui correspond à la position actuelle des sphères. Ajoutez algébriquement D′ à D, soit D_1 cette somme.

Les sphères devront être déplacées de façon que la distance commune au centre du compas corresponde à la quantité $\sqrt{D_1^2 + E^2}$.

Si on ne peut rapprocher assez les sphères employées, on devra en prendre de plus grosses et les placer à la distance qui convient à leur diamètre et à la violence trouvée par le radical précédent.

Pour orienter la ligne des centres, on cherche l'angle $2m$ tel que $\operatorname{tang} 2m = \frac{E}{D_1}$. L'angle m étant compté autour du centre du compas, de 0 à 90° à partir de la portion de la perpendiculaire à la quille qui va vers tribord, positivement vers l'arrière, négativement vers l'avant.

A la valeur trouvée pour m correspond une droite, considérons également sa perpendiculaire. C'est suivant une de ces deux droites que doit être orientée la ligne des centres des sphères, si D_1 est négatif, on prend celle des deux droites dont la direction se rapproche le plus de celle de la quille. Si, au contraire, D_1 est positif, on prend celle dont la direction se rapproche le plus de la perpendiculaire à la quille.

Nous ne saurions trop répéter que cette complication ne se présentera qu'exceptionnellement. Elle ne saurait, d'ailleurs, faire rejeter la méthode, car on se trouve alors dans des circonstances où, sans elle, il faudrait renoncer à se servir du compas et de plus, même dans ce cas extrême, la compensation complète exigera moins d'une heure. C'est le tiers environ du temps qu'exige actuellement la régulation des compas d'un navire, dès que sa longueur dépasse cinquante mètres, et qu'on opère avec un peu de brise ou dans un port soumis à la marée.

N. B. — Si les lectures ont montré qu'il existait un coefficient E assez notable pour être corrigé, il ne faut pas oublier que l'orientation convenable de la ligne des centres des sphères aura modifié la valeur du coefficient A. Il faudra donc déterminer à nouveau la valeur absolue de ce coefficient, dont la valeur aura changé, d'autant plus que la ligne des centres aura été tournée d'un angle plus grand.

CHAPITRE IV

CONTROLE DE LA COMPENSATION A LA MER

La compensation ainsi faite n'est exacte que pour le lieu où elle a été effectuée. Toutes les fois que le navire suit une route perpendiculaire, soit aux courbes d'égale force horizontale, soit aux courbes d'égale inclinaison, il faut surveiller avec soin le compas ; nous avons déjà dit comment cette surveillance devait être exercée quand on peut avoir des relèvements. On peut de même l'opérer avec le déflecteur.

Dans les navires ayant déjà navigué et dont les compas ont été compensés au moyen du Flinders, ce contrôle se fait très simplement. Il suffit de s'assurer qu'à la route suivie par le navire, la lecture donnant l'écart normal correspond bien au nombre de la quatrième colonne qui est égal au produit $\lambda H'$, H' étant la force horizontale terrestre au lieu d'observation.

Quand une même route sera suivie pendant plusieurs jours, on remarquera, en général, que la lecture diminue de plus en plus, jusqu'à une certaine valeur limite. Cette diminution progressive tient à la prolongation de la route suivie; comme nous l'avons expliqué dans la troisième partie, à propos des phénomènes observés par MM. Gaschard et Maureau à bord du *Tonkin*.

Si, comme nous recommandons expressément de le faire, on a eu soin de tenir compte, non seulement de toutes les déviations anormales observées, mais encore de leur influence sur la lecture correspondante d'écart normal, on pourra par temps de brume, grâce seulement à la lecture d'écart normal ou au moyen des formules de la page 256*a*, corriger l'indication du compas de l'erreur accidentelle due à la route actuelle ou à la route immédiatement antérieure à celle que l'on prend, quand l'une ou l'autre ont été suivies pendant plusieurs jours. La différence de la lecture normale avec la lecture anormale donnera en effet la correction à apporter aux coefficients B et C.

Navires neufs ou non munis de Flinders. — Dans la plupart des navires, c'est la position des aimants longitudinaux qu'il faut surveiller avec le plus de soin. Par conséquent, en temps de brume, c'est aux caps Nord et Sud du compas qu'il faudra surtout faire fréquemment l'observation d'écart normal, pour voir si les deux lectures correspondantes continuent à être égales entre elles.

Voici comment il convient de contrôler le compas en temps de brume :

On fait successivement l'observation d'écart normal aux trois caps suivants :

La route du navire. Les deux caps cardinaux du compas adjacents à cette route et on note la lecture trouvée à chacun de ces trois caps.

Si, à ces trois caps, on trouve la même lecture aux limites près de tolérance adoptées, si de plus, la valeur numérique de la force correspondante à cette lecture commune, prise dans la quatrième colonne verticale du tableau, est égale à deux centièmes près au produit $\lambda H'$ il n'y a pas lieu de rectifier la compensation.

Si les trois lectures sont encore égales, mais que la force correspondante n'ait pas la valeur indiquée, ou bien si ces trois lectures diffèrent d'une quantité plus grande que la tolérance convenable, il y a lieu de contrôler la compensation de la façon suivante :

On met le bâtiment à celui des deux caps Nord et Sud qu'on n'a pas encore couru. On fait à ce cap l'observation d'écart normal.

Si cette lecture est égale à celle trouvée déjà au cap cardinal opposé, la position des aimants longitudinaux est correcte.

Si elle est différente, on déplace ces aimants de façon à obtenir l'écart normal avec la moyenne des deux lectures faites au Nord et au Sud.

En général, dans la plupart des navires, la lecture d'écart normal qui convient ainsi aux caps Nord et Sud, après le déplacement des aimants, est précisément égale aux limites près de la tolérance adoptée à la lecture faite à celui des deux caps Est ou Ouest déjà couru.

S'il en est ainsi, on peut se dispenser de vérifier l'exactitude de la position des aimants transversaux.

Mais si ces deux lectures diffèrent, on doit mettre le navire à celui des deux caps Est ou Ouest que l'on n'a pas encore couru, faire l'observation d'écart normal, et si la lecture correspondante diffère de celle obtenue précédemment au cap diamétralement opposé, déplacer les aimants transversaux de façon à obtenir l'écart normal, au cap actuellement couru, avec une lecture égale à la moyenne des deux lectures obtenues successivement à l'Est et à l'Ouest.

Quand le bâtiment a déjà un certain temps de service, les lectures communes obtenues ainsi, d'une part au Nord et au Sud, d'autre part à l'Est et à l'Ouest, après le déplacement de l'un ou même des deux systèmes d'aimants correcteurs, s'il est nécessaire, sont égales entre elles et il n'y a pas lieu dès lors de déplacer les sphères.

Quand cette égalité n'existe pas au dernier cap cardinal couru, on déplace les sphères de façon à obtenir l'écart normal avec une lecture égale à la moyenne des deux lectures communes.

La rectification de la compensation horizontale terminée, on procède ensuite à la rectification de la compensation pour la bande.

Quand la route ne fait pas un angle d'au moins trente degrés avec l'une des deux lignes NS ou EO, il est bon de faire une quatrième lecture de vérification au cap quadrantal intermédiaire.

Exemple numérique. — Au départ de Toulon, après la compensation terminée, la lecture commune à tous les caps était la division 10. Le nombre de la troisième colonne verticale correspondant à cette division est 0,88. C'est la valeur de λ.

Arrivé dans un lieu situé par 20 degrés de longitude Ouest et 20 degrés de latitude Nord, on veut contrôler la compensation du compas. Dans ce lieu $H' = 1,6$. Donc $\lambda H' = 1,41$.

On fait la lecture d'écart normal à la route suivie N 35 E par exemple par le bâtiment, soit 24; puis au cap Est, soit 23,5; puis enfin au cap Nord, soit 24,5.

Ces trois lectures diffèrent entre elles de quantités moindres que les limites de tolérance adoptée, et correspondant, de plus, à la force 1,41 de la quatrième colonne verticale, il n'y a pas lieu de procéder encore à la rectification de la compensation.

CHAPITRE V

PRINCIPES DE LA RÉGULATION DU COMPAS AU MOYEN DU DÉFLECTEUR

La supériorité de la méthode de sir William Thomson, qui consiste à employer le déflecteur, pour égaliser les forces directrices aux différents caps, en en faisant un instrument de compensation, est incontestable, car cette méthode supprime tout calcul. De plus, en donnant à la force directrice une valeur constante, elle permet d'obtenir, au moyen d'une seule observation faite à bord et à terre, la constante λ qui, non seulement donne une force qui oriente l'aiguille à bord, mais encore nous permet de corriger très approximativement la déviation due à la bande, en nous indiquant la valeur qu'il faut attribuer au coefficient μ et que nous pouvons donner à ce dernier à l'aide du barreau compensateur vertical et des indications de l'aiguille d'inclinaison de sir W. Thomson.

Trouver la valeur des trois coefficients $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, au moyen du déflecteur. — Mais si, pour un motif quelconque, on ne voulait pas, sur un navire neuf, en temps de brume, toucher à la compensation déjà obtenue, on pourrait aisément obtenir, au moyen du déflecteur, les valeurs prises par les coefficients variables $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ quand le navire change de latitude, et aussi celle plus faible que peut prendre le coefficient $\mathfrak{D}$, quand le navire est neuf et fait ses premiers voyages.

La méthode de régulation repose sur l'hypothèse que le compas a déjà été compensé assez approximativement pour que les déviations ne soient jamais supérieures à 10 degrés. S'il en est ainsi, on peut aisément démontrer les deux propositions suivantes :

1° Si, à deux routes diamétralement opposées, les forces directrices F et F′ qui orientent l'aiguille sont égales, la déviation semi-circulaire du compas est nulle pour les deux routes perpendiculaires aux premières.

Si, au contraire, ces forces directrices sont inégales, le coefficient de la déviation semi-circulaire qui convient aux deux dernières routes est à 57°3 comme $F - F'$ est à $F + F'$;

2° Si on appelle f et f' les forces directrices correspondant aux deux dernières routes, le coefficient de la déviation quadrantale pour les routes inclinées à 45 degrés sur les quatre routes précédentes est à 57°,3 comme $(F + F') - (f + f')$ est à $F + F' + f + f'$.

Pour le démontrer, prenons les deux formules (70) et (71) qui nous ont déjà servi plus haut, et mettons successivement le cap du navire aux quatre caps cardinaux du compas. Dans chacune de ces positions, l'une des deux composantes précédentes sera nulle ou du moins négligeable, et nous pourrons prendre, pour valeur de la force directrice de l'aiguille, celle de la composante qui subsiste, *changée ou non de signe* suivant le cap du navire.

Si nous appelons R_0, R_8, R_{16}, R_{24} les forces directrices *vers le Nord* dans chacune des quatre positions du cap, Nord, Est, Sud, Ouest du compas et si nous remplaçons, ce qui est permis, vu la petitesse des déviations, le cap magnétique par le cap au compas, dans les formules précédentes, nous aurons :

$$
\begin{aligned}
&(1) \quad R_0 = H(1 + a) + cZ + P,\\
&(2) \quad R_8 = H(1 + e) - (fZ + Q),\\
&(3) \quad R_{16} = H(1 + a) - (cZ + P),\\
&(4) \quad R_{24} = H(1 + e) + (fZ + Q).
\end{aligned}
$$

Et par suite :

$$\frac{R_0 - R_{16}}{R_0 + R_{16}} = \frac{2\,(cZ+P)}{2\,H\,(1+a)} = \text{approx.}\ \frac{cZ+P}{H\left(1+\dfrac{a+e}{2}\right)} = \frac{cZ+P}{\lambda H} = \mathfrak{B}.$$

On aurait avec la même approximation :

$$\frac{R_{24} - R_8}{{}_{24} + R_8} = \mathfrak{C}.$$

Et enfin :

$$\frac{R_0 + R_{16} - (R_8 + R_{24})}{R_0 + R_{16} + \ R_8 + R_{24}} = \frac{2\,H\,(a-e)}{4\,H\left(1+\dfrac{a+e}{2}\right)} = \frac{\dfrac{a-e}{2}}{1+\dfrac{a+e}{2}} = \mathfrak{D}.$$

De $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$, on passera à B, C, D, soit en multipliant simplement par 57,3 s'ils ont des valeurs très faibles, soit plus exactement par les formules (54) p. (163).

Nous avons dit plus haut quelles sont les valeurs des coefficients B, C, D et E en fonction des lectures faites sur le déflecteur gradué

De l'utilité de la mesure des forces horizontales. — Nous avons déjà dit quelques mots de cette question (p. 36 et p. 241).On peut à bon droit s'étonner que ce problème important ait été abandonné pendant si longtemps, après que le général sir E. Sabine en eût indiqué une solution restreinte, il est vrai, mais dont le principe est absolument général. En 1862, M. le lieutenant de vaisseau Raphaël fit en France une nouvelle tentative, mais elle fut abandonnée rapidement. La question fut reprise en 1871 par M. le capitaine de frégate Fournier, qui (v. p. 37) publia, en 1873, l'ouvrage dans lequel il développa ses précédentes brochures et donna les formules définitives qu'il propose. C'est pour l'application de sa méthode que M. Fournier fit construire l'appareil auquel il a donné le nom d'alidade déviatrice et qui consiste en une règle de cuivre pouvant tourner autour de l'axe vertical de suspension de la rose et portant à ses deux extrémités, à égale distance du centre de la rose, deux aimants qui se regardent par leurs pôles de noms opposés. Si on fait tourner cette alidade, elle entraîne l'aiguille aimantée de la rose avec elle et l'écarte de sa position d'équilibre, d'un angle qui est maximum quand l'alidade est perpendiculaire à la ligne Nord-Sud de la rose déviée.

Si le couple perturbateur produit sur l'aiguille par l'alidade est constant, (et il en est ainsi, tant que la distance des aimants à la rose ne change pas et que la position de l'alidade reste la même par rapport à celle de l'aiguille déviée), on sait, d'après ce que nous avons vu (p. 36) que le rapport des forces horizontales qui orientent l'aiguille du compas est égal au rapport inverse des écarts imprimés à cette même aiguille.

Il s'agit, pour faire de bonnes observations, de fixer les aimants dans la position la plus convenable pour que les écarts maximums se maintiennent entre des limites, facilement observables d'abord, et telles ensuite que les erreurs d'observation inévitables aient le moins d'influence possible sur les résultats. M. Fournier conseille de maintenir ces écarts entre 25 et 55 degrés, pour les observations faites dans un lieu donné, et il donne les moyens de déterminer les distances des aimants de façon qu'il en soit ainsi. Il réunit les données obtenues au point de départ dans une table qui permet alors d'obtenir le même résultat quand, le navire se déplaçant, la force horizontale de la terre change, ce qui fait évidemment varier l'écart maximum observé à un cap déterminé.

Des écarts maximums observés, on passe ensuite aux coefficients par des formules relativement simples si on songe à la difficulté du problème, mais d'une application peut-être difficile dans la pratique journalière du service à bord. Nous craignons que ce ne soient ces formules qui aient empêché de tirer du travail important et considérable de M. Fournier tout ce qu'il pouvait donner de sécurité à la navigation.

Si nous ne donnons pas ici le résumé des formules de M. Fournier, c'est que, leurs notations différant notablement de celles qui ont été choisies par M. Archibald Smith et qu'il nous paraît préférable d'adopter, nous craignons qu'elles ne produisent une confusion regrettable dans l'esprit de nos lecteurs.

Peu de temps après, M. Caspari, ingénieur-hydrographe de la marine, reprit le même problème. Nous résumons rapidement la solution qu'il propose et dont le principe ne diffère pas de celui que nous avons déjà indiqué plusieurs fois. D'ailleurs, il a fort clairement exposé cette solution dans une brochure intitulée : *Régulation des compas par des Observations de Force horizontale*, et qui est délivrée aux Bâtiments de la Marine de Guerre ; on pourra donc facilement compléter ce que nos explications auraient de trop succinct. D'après ses propres expression, son but a été de simplifier encore la méthode de M. Fournier en l'appuyant sur les mêmes principes, mais en n'introduisant à bord aucun appareil nouveau. Et pour cela il prend comme alidade déviatrice la pinnule du compas de relèvement ordinaire, sur laquelle il place une aiguille aimantée ayant à peu près la même force directrice que l'aiguille du compas. Il conseille même de se servir à cet égard d'une simple rose de rechange qu'on fera tourner autour du même axe vertical que celle du compas, et qu'on pourra au besoin lester à égale distance de son centre de deux petits aimants se regardant par leurs pôles de noms opposés.

M. Caspari n'adopte pas 90 degrés pour l'angle que doivent faire l'aiguille déviée et celle qui la dévie, et qui doit rester constant durant une même série d'expériences. On appelle angle polaire cet angle constant. Le théorème de la page 36 s'applique encore ici, et M. Caspari lui donne la forme suivante qui, en somme, exprime le même principe. Si l'on observe avec le même appareil à différents caps du navire, avec le même angle polaire arbitrairement choisi, l'écart de l'aiguille, les produits des sinus des écarts par les forces directrices sont constants.

M. Caspari conseille, pour les mêmes raisons que M. Fournier, de maintenir les écarts de l'aiguille déviée entre 2 quarts et 6 quarts. On arrive à rester entre ces limites en fixant, par tâtonnements, la distance des aimants entre eux et l'angle polaire. Cela posé, il tire des formules (44) et (45), où il remplace ζ par $\zeta' + \delta$ et où il donne successivement à ζ' les quatre valeurs 0, 90 180 et 270 degrés, huit expressions qui lui donnent le moyen de calculer aisément les coefficients $\mathfrak{B}$, $\mathfrak{C}$, $\mathfrak{D}$. Mais, comme le coefficient $\mathfrak{D}$ est constant et qu'on peut l'obtenir une fois pour toutes dans le port de départ, il s'occupe spécialement de la détermination des coefficients variables $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ au moyen de trois observations faites à trois caps cardinaux.

Des instruments destinés à la mesure des forces horizontales. — On peut varier à l'infini les dispositions instrumentales de ces appareils, mais tous reposent sur le même principe, celui de la boussole des sinus de Pouillet. Dernièrement encore, M. Hanusse, ingénieur hydrographe, a imaginé un nouveau dispositif. Ce qui rend leur emploi jusqu'à un certain point délicat, ce qui les a empêchés d'être adoptés dans la pratique courante, c'est avant tout la nécessité d'avoir à faire varier, séparément ou simultanément, soit l'angle polaire, soit la position des aimants, quand le navire se déplace à la surface du globe : déplacement qui entraîne les variations de la composante terrestre et des forces perturbatrices qui agissent sur l'aiguille du compas; ce sont ensuite les formules plus ou moins compliquées au moyen desquelles on passe des quantités observées aux coefficients de la déviation.

Avantages du déflecteur. — A nos yeux, la supériorité de l'instrument de sir W. Thomson provient avant tout de son facile ajustement et des limites étendues entre lesquelles sa force perturbatrice peut varier suivant que son index est à l'une ou l'autre des extrémités de sa course. Mais il faut bien ajouter que cet appareil tire un avantage considérable et indirect de la parfaite coordination de tous les organes du compas et du choix de la solution adoptée pour assurer la stabilité mécanique de la rose en même temps que la compensation rigoureuse de la déviation quadrantale. En effet, le faible moment magnétique total donné aux aiguilles de la rose, pour atteindre ce double résultat, assure en même temps au déflecteur une puissance plus considérable sur la rose et permet d'atteindre aisément l'angle d'écart de 90 degrés malgré les variations de la composante terrestre. Cet angle d'écart est lui-même heureusement choisi : d'abord il est constant; ensuite, sa valeur absolue permet de l'observer aisément d'après les marques distinctives des différentes divisions de la rose; enfin, grâce à la faible variation du sinus d'un arc quand cet arc approche de 90 degrés, il en résulte que les quelques degrés d'erreur que peuvent produire une embardée ou une fausse direction du cap pendant l'observation n'auront qu'une influence insensible sur les résultats.

En somme, adapté au compas de sir W. Thomson dont il n'est qu'un organe auxiliaire, le déflecteur est en réalité un instrument de compensation et non de régulation du compas, ce qui supprime du même coup et l'emploi de formules plus ou moins simples et toutes les erreurs de calculs qui en dérivent : tous ceux qui ont dû faire des observations à la mer savent le prix de cet avantage sans qu'il soit nécessaire d'y insister.

La simplicité de cet appareil et la facilité de son emploi sont telles, que nous estimons qu'il remplit toutes les conditions qu'on peut imposer aux instruments destinés aux observations courantes faites à bord : à coup sûr, celles qu'on doit opérer avec cet instrument sont beaucoup plus simples que celles qui sont nécessaires, par exemple, à la rectification du sextant, que tout marin appelé à commander ou à être chargé du service des montres doit pouvoir effectuer.

Boussole d'intensité du commandant Fournier. — En 1885, M. le capitaine de vaisseau Fournier a fait construire dans les ateliers de la maison Breguet une boussole d'intensité destinée à donner directement la mesure de la force directrice du compas. Pour que cet instrument donne des résultats exacts, il faut que l'on puisse considérer la distance des aiguilles aimantées de la boussole d'intensité aux masses de fer ou aimants comme égale à celle des aiguilles aimantées de la rose que l'on doit enlever pour effectuer la mesure. Cette condition se trouve toujours réalisée avec une exactitude suffisante pour la pratique, pour les compas non compensés, mais il peut ne plus en être de même si le compas est partiellement compensé. Le commandant Fournier a exposé la théorie et l'emploi de cette boussole et du dromoscope qu'il a proposé dans deux brochures publiées chez Gauthier-Villars.

CHAPITRE VI

COMPAS CORRECTEUR DE M. J. PEICHL.

Il nous reste, pour terminer l'exposé de cette question de la régulation et de la compensation des compas par temps de brume, à parler d'un dernier appareil imaginé par M. le lieutenant de vaisseau J. Peichl, reposant sur un tout autre principe que celui des instruments que nous venons d'examiner.

M. Peichl met à profit les propriétés de l'aiguille d'inclinaison que nous avons indiquées p. 33 et que nous allons rappeler ici. Quand une aiguille aimantée peut tourner autour d'un axe horizontal et que ce dernier décrit le plan entier de l'horizon, on sait que l'angle de l'aiguille avec l'horizon varie pendant le mouvement de son axe de rotation. Minimum quand l'aiguille oscille dans le plan du méridien magnétique, c'est-à-dire quand son axe est perpendiculaire à ce plan, cet angle est droit quand l'aiguille oscille dans le plan Est-Ouest, c'est-à-dire quand l'axe horizontal est dirigé dans le méridien magnétique. Enfin, si on compare les inclinaisons de l'aiguille dans deux plans verticaux quelconques, on trouve qu'elles sont égales toutes les fois que ces plans sont également écartés du méridien magnétique, c'est-à-dire symétriques par rapport à ce dernier plan. On appelle « azimuts correspondants » l'ensemble de deux plans verticaux également écartés du méridien, et il est évident que si on peut déterminer, soit l'azimut où l'inclinaison est minimum, soit deux azimuts correspondants, on aura, immédiatement dans le premier cas, et, en prenant le plan bissecteur des deux azimuts correspondants, dans le second cas, la position du méridien magnétique. On sait qu'une quantité varie toujours très peu dans les environs d'un de ses maximum ou minimum; par suite, si on veut déterminer la position de la ligne Nord-Sud magnétique au moyen du minimum de l'inclinaison, on pourra commettre aisément 1 degré d'erreur même avec des instruments très délicats, et davantage encore avec des instruments ordinaires d'observation. On préfère donc s'adresser à la méthode des azimuts correspondants. Mais, pour l'appliquer à bord, il fallait résoudre deux difficultés, l'une expérimentale, l'autre théorique.

Pour surmonter la première il fallait imaginer pour l'aiguille d'inclinaison un système de suspension qui fût à la fois pratique et suffisamment sensible; d'après les rapports faits sur les expériences exécutées à bord de plusieurs navires de guerre autrichiens, M. Peichl a fort heureusement résolu le premier problème. Restait la difficulté théorique, qui consistait à analyser, et à estimer pour pouvoir en tenir compte, l'influence des forces magnétiques émanées du navire qui troublent le libre jeu de l'aiguille d'inclinaison. En effet les composantes horizontales et verticales de la force magnétique exercée par le fer du navire sur le pôle n de l'aiguille aimantée varient avec la direction du cap du bâtiment, et en s'ajoutant, dans un cap donné avec leurs valeurs correspondant à ce cap, aux composantes terrestres de même nom, elles altèrent le rapport qui existe entre ces dernières et par suite la tangente de l'inclinaison. Nons ne pouvons donc pas tirer des variations de cette dernière quantité à bord les conclusions que nous donneraient des observations faites à terre.

Mais il faut bien observer la différence capitale des effets produits par la force émanée du magnétisme sous-permanent et par celle qui provient du magnétisme induit. En effet, la grandeur de la première force est constante et sa direction est fixe par rapport au bâtiment. Quand ce dernier tourne autour de la verticale, cette force se déplace avec lui, la grandeur de ses composantes horizontales et verticales reste constante, et, si, l'axe de rotation de l'aiguille d'inclinaison reste fixe par rapport au navire, il en résulte que cette force constante, faisant toujours le même angle avec le plan d'oscillation de l'aiguille, exercera toujours la même influence sur elle, par suite elle modifiera la valeur absolue de l'inclinaison, mais n'en troublera pas la variation.

Il en est tout autrement de la force provenant du fer doux, qui varie à la fois en grandeur et en direction avec le cap de bâtiment. Par conséquent, si le navire étant à un cap magnétique quelconque ζ, on place l'aiguille d'inclinaison de façon qu'elle oscille dans le plan Nord-Sud magnétique, puis qu'on fasse tourner le navire, alternativement sur bâbord et sur tribord, sans changer par rapport à lui la position de l'axe de rotation de l'aiguille, on trouvera que les inclinaisons de l'aiguille sont égales, non pas pour les caps du bâtiment $\zeta + \omega$ et $\zeta - \omega$, mais bien pour les caps $\zeta + \omega_1$ et $\zeta - \omega_2$.

Par conséquent l'aiguille a été écartée de part et d'autre du méridien magnétique, non pas de deux angles égaux chacun à ω, mais de deux angles inégaux ω_1 et ω_2. Au moyen des formules (8) (9) et (39). (cette dernière légèrement modifiée), M. Peichl a formé l'expression $\omega_1 - \omega_2$, et a montré que, si comme d'ordinaire on néglige le coefficient $\mathfrak{E}$, le paramètre h ainsi que la partie de A qui provient du fer doux dissymétrique, on avait :

$$\omega_1 - \omega_2 = \varepsilon = \mathfrak{A} - \left(\frac{g}{\lambda} \sin \zeta + \mathfrak{D} \sin 2\zeta\right) \sin \omega,$$

où $\mathfrak{A}$ ne renferme plus que les erreurs d'observations qui sont constantes, ε s'appelle l'erreur azimutale correspondant au cap ζ.

On pourrait corriger mécaniquement les différentes parties de cette erreur comme nous avons corrigé les différents coefficients de δ, mais, comme elle n'altère pas la sensibilité de l'appareil, qu'elle est constante pour un même cap dans tous les lieux du globe, (si ω est lui-même constant), on préfère ne pas introduire de correcteurs nouveaux qui compliqueraient l'appareil, et déterminer par l'observation, une fois pour toutes, au port de départ, les valeurs de ε correspondant aux différents caps magnétiques, valeurs qu'on réunit dans une table pour en tenir compte, comme nous le dirons plus loin.

D'ailleurs, plus ω sera petit et plus ε sera faible, mais par contre aussi, plus les variations de l'inclinaison deviendront faibles, difficiles à observer et sujettes par suite à donner des erreurs considérables. Pour éviter cet inconvénient, tout en conservant à ω la valeur constante et faible nécessaire, 20 à 25 degrés environ, M. Peichl a disposé d'une façon fort ingénieuse autour de l'aiguille d'inclinaison des aimants et des barreaux de fer doux qu'il appelle Régulateur d'inclinaison. Ces régulateurs ont pour but d'augmenter, pour un angle ω donné, les variations absolues de l'inclinaison et de les rendre assez considérables pour pouvoir être observées exactement sans toutefois altérer les lois de ces variations.

L'axe de rotation de l'aiguille d'inclinaison est d'ailleurs fixé à une monture qu'on peut faire tourner autour d'un axe vertical, ce qui permet de pouvoir faire coïncider le plan d'oscillation de l'aiguille avec le méridien magnétique, quel que soit le cap du bâtiment. Pour rendre cette orientation aisée, l'instrument est muni d'un index qui se déplace sur un cercle azimutal. Cela étant, il nous est facile d'indiquer le principe de l'emploi de cet appareil.

Supposons que le bâtiment étant à un cap ζ' donné par un compas exactement ou approximativement compensé, mais dont on connaisse la table de déviation, on veuille vérifier le compas, c'est-à-dire savoir le cap magnétique exact qui correspond à ζ'. Pour cela, de cette route ζ' on passera à la route magnétique très approchée ζ, au moyen de la table des déviations, et on orientera l'axe de l'aiguille d'inclinaison de façon qu'elle oscille dans le méridien magnétique, ce qu'on obtient en plaçant l'index du cercle azimutal du compas correcteur sur la division ζ +, erreur azimutale de l'instrument. Cela fait, on sait que le plan d'oscillation de l'aiguille coïncide avec le méridien magnétique ou du moins en est très voisin. On réduit alors la grandeur de l'inclinaison à une valeur commode pour l'observation, au moyen des régulateurs, et on fait abattre successivement le navire sur tribord puis sur bâbord; on note les azimuts du compas qui correspondent à des valeurs égales observées pour l'inclinaison de part et d'autre du méridien magnétique. Si la somme des deux arcs décrits sur bâbord et sur tribord, lus sur le compas, n'excède pas 90, et si la moyenne des deux azimuts correspondants ne diffère pas de la route magnétique ζ de plus de 5 degrés, il faudra gouverner au compas sur la route qui correspond à cette moyenne.

Au contraire, si l'amplitude des deux abattées du bâtiment dépasse 90 degrés, ou si la moyenne des azimuts correspondants lus sur le compas compensé diffère de plus de 5 degrés de la route ζ, cela indique que la déviation du compas compensé a notablement varié, et qu'il faut rectifier sa compensation suivant des règles fort simples que donne M. Peichl.

On peut d'ailleurs, d'après ce que nous avons dit plus haut sur l'angle constant que fait la force due au magnétisme permanent avec le plan d'oscillation de l'aiguille, trouver sans tables de déviations le cap du bâtiment qui pour une position donnée et invariable de l'axe de rotation de l'aiguille la place à très peu dans le méridien magnétique. Il suffit pour cela, cet axe de rotation étant dans une position déterminée, de faire tourner lentement le navire jusqu'à ce qu'on observe l'inclinaison minima. *A ce moment*, l'aiguille sera très près du méridien magnétique, et on pourra rectifier le cap correspondant du compas en opérant comme nous venons de le dire.

Quand le compas n'est pas compensé du tout, les azimuts *correspondants* qu'on obtient sur sa rose peuvent encore servir à contrôler et à corriger la table des déviations, mais il faut, pour exposer la méthode, recourir à une nouvelle théorie que M. Peichl appelle *Théorie de la moyenne déviation;* elle sera facilement saisie par tous ceux qui auront lu ce qui précède; mais nous ne pouvons la reproduire ici, et nous renvoyons, pour les détails, aux brochures mêmes de l'inventeur, publiées en 1879, 80 et 81, dans les *Mittheilungen aus dem Gebiete des Seewesens*. Le résultat auquel cette théorie permet de parvenir peut se résumer de la manière suivante : si on prend la différence entre la route magnétique ζ, obtenue au moyen du compas correcteur et de l'inclinaison minima, et la moyenne des azimuts correspondants lus sur le compas qu'on veut vérifier, on obtient une quantité que M. Peichl appelle la déviation *moyenne* et qui donne soit la déviation du compas, soit les moyens de rectifier sa compensation.

Nous voici donc en présence d'une deuxième solution du problème si important de la régulation et de la compensation du compas en temps de brume. Cette solution fait honneur aux connaissances et à l'habileté de celui qui l'a imaginée et qui a su la rendre complète et suffisamment pratique. Mais, malgré ses mérites que nous ne méconnaissons point, nous lui préférons la solution obtenue au moyen du déflecteur. Avec celui-ci, en effet, les observations préliminaires sont supprimées, les observations principales sont moins longues, plus aisées, et obtenues d'ailleurs avec un appareil beaucoup plus simple, plus solide, qui n'a pas à compter avec toutes les erreurs et toutes les difficultés qu'entraîne toujours, même à terre, l'emploi de l'aiguille d'inclinaison.

Toutefois si le déflecteur doit, d'après nous, être préféré à cause de sa grande simplicité et de l'apprentissage fort aisé par lequel on peut se rendre maître de son maniement, il convient d'insister sur ce que M. Peichl, lui aussi, est parvenu d'une façon vraiment originale à résoudre, avec une exactitude bien suffisante pour la pratique, ce redoutable problème d'assurer la sécurité de la navigation en temps de brume, qui a si longtemps fait l'objet légitime des préoccupations et des recherches des marins.

CONCLUSION

Nous avons terminé ici la tâche que nous nous étions imposée d'exposer les différentes méthodes qui, actuellement, permettent de contrôler et de rectifier, avec simplicité et certitude à la fois, les indications des compas à bord des bâtiments en fer. Nous croyons que le lecteur qui aura bien voulu nous suivre, reconnaîtra que ces difficiles problèmes sont aujourd'hui résolus d'une façon aussi complète que pratique par le compas et les appareils auxiliaires de sir W. Thomson.

Mais, de peur que le succès obtenu n'inspire aux marins une confiance trop absolue et par suite dangereuse, nous nous permettrons, en finissant, de mettre sous leurs yeux une dernière règle, à notre avis la plus importante de toutes. Cette règle, adoptée successivement par Archibald Smith, par le capitaine de vaisseau Evans, par sir William Thomson par tous les savants enfin, qui se sont occupés de la question, rappelée avec insistance dans tous leurs ouvrages, emprunte, ce nous semble, un caractère tout particulier de gravité au nom de celui qui l'a formulée pour la première fois, sir G. Airy, l'astronome royal d'Angleterre et une des plus hautes autorités scientifiques de ce siècle. En voici la traduction. :

Règle de sir G. Airy. — « On ne doit jamais accorder plus de « confiance aux indications d'un compas compensé qu'à celles du « chronomètre à l'aide duquel on détermine les longitudes. On « peut se fier à ce compas même pendant de longues distances, mais « on *doit* contrôler ses indications par l'observation *toutes les fois que « cela est possible.* »

TABLE DES PRODUITS DES ARCS

DE QUINZE MINUTES EN QUINZE MINUTES

de $0°0'$ à $32°45'$

PAR LES SINUS DES RUMBS,

OU

S_1, S_2, S_3, S_4 S_5, S_6 S_7,

$S_1 = \sin \text{nat } 11°15' = 0,19509$
$S_2 = \sin \text{nat } 22°30' = 0,38268$
$S_3 = \sin \text{nat } 33°45' = 0,55557$
$S_4 = \sin \text{nat } 45°\ 0' = 0,70711$
$S_5 = \sin \text{nat } 56°15' = 0,83147$
$S_6 = \sin \text{nat } 67°30' = 0,92388$
$S_7 = \sin \text{nat } 78°45' = 0,98078$

TABLE DES SINUS, TANGENTES... ETC., NATURELS,

N. B. Ces tables étant déjà imprimées, nous ne les modifions pas. Il est pourtant plus commode, pour tous les calculs, d'exprimer les angles en degrés et dixièmes de degré.

Arcs. 0° 0'-8° 45'.	S_1 (Sin. 11°15').	S_2 (Sin. 22°30').	S_3 (Sin. 33°45').	S_4 (Sin. 45°	S_5 (Sin. 56°15').	S_6 (Sin. 67°30').	S_7 (Sin. 78°45').	Arcs 0° 0'-8° 45
0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'	0° 0'
0 15	0 3	0 6	0 8	0 11	0 12	0 14	0 15	0 15
0 30	0 6	0 11	0 17	0 21	0 25	0 28	0 29	0 30
0 45	0 9	0 17	0 25	0 32	0 37	0 42	0 44	0 45
1 0	0 12	0 23	0 33	0 42	0 50	0 55	0 59	1 0
1 15	0 15	0 29	0 42	0 53	1 2	1 9	1 14	1 15
1 30	0 18	0 34	0 50	1 4	1 15	1 23	1 28	1 30
1 45	0 21	0 40	0 58	1 14	1 27	1 37	1 43	1 45
2 0	0 23	0 46	1 7	1 25	1 40	1 51	1 58	2 0
2 15	0 26	0 52	1 15	1 36	1 52	2 5	2 12	2 15
2 30	0 29	0 57	1 23	1 46	2 5	2 19	2 27	2 30
2 45	0 32	1 3	1 32	1 57	2 17	2 32	2 42	2 45
3 0	0 35	1 9	1 40	2 7	2 30	2 46	2 57	3 0
3 15	0 38	1 15	1 48	2 18	2 42	3 0	3 11	3 15
3 30	0 41	1 20	1 57	2 29	2 55	3 14	3 26	3 30
3 45	0 44	1 26	2 5	2 39	3 7	3 28	3 41	3 45
4 0	0 47	1 32	2 13	2 50	3 20	3 42	3 55	4 0
4 15	0 50	1 38	2 22	3 0	3 32	3 56	4 10	4 15
4 30	0 53	1 43	2 30	3 11	3 45	4 10	4 25	4 30
4 45	0 56	1 49	2 38	3 22	3 57	4 23	4 40	4 45
5 0	0 59	1 55	2 47	3 32	4 9	4 37	4 54	5 0
5 15	1 2	2 1	2 55	3 43	4 22	4 51	5 9	5 15
5 30	1 4	2 6	3 3	3 53	4 34	5 5	5 24	5 30
5 45	1 7	2 12	3 12	4 4	4 47	5 19	5 38	5 45
6 0	1 10	2 18	3 20	4 15	4 59	5 33	5 53	6 0
6 15	1 13	2 24	3 28	4 25	5 12	5 46	6 8	6 15
6 30	1 16	2 29	3 37	4 36	5 24	6 0	6 23	6 30
6 45	1 19	2 35	3 45	4 46	5 37	6 14	6 37	6 45
7 0	1 22	2 41	3 53	4 57	5 49	6 28	6 52	7 0
7 15	1 25	2 47	4 2	5 8	6 2	6 42	7 7	7 15
7 30	1 28	2 52	4 10	5 18	6 14	6 56	7 21	7 30
7 45	1 31	2 58	4 18	5 29	6 27	7 10	7 36	7 45
8 0	1 34	3 4	4 27	5 39	6 39	7 24	7 51	8 0
8 15	1 37	3 10	4 35	5 50	6 52	7 37	8 6	8 15
8 30	1 40	3 15	4 43	6 1	7 4	7 51	8 20	8 30
8 45	1 42	3 21	4 52	6 11	7 16	8 5	8 35	8 45

ARCS. 9°0'-17°45'	S_1 (Sin. 11°18').	S_2 (Sin. 22°30').	S_3 (Sin. 33°45').	S_4 (Sin. 45°).	S_5 (Sin. 56°15').	S_6 (Sin. 67°30').	S_7 (Sin. 78°45').	ARCS. 9°0'-17°45
9° 0'	1°45'	3°27'	5° 0'	6°22'	7°29'	8°19'	8°50'	**9° 0'**
9 15	1 48	3 32	5 8	6 32	7 41	8 33	9 4	**9 15**
9 30	1 51	3 38	5 17	6 43	7 54	8 47	9 19	**9 30**
9 45	1 54	3 44	5 25	6 54	8 6	9 0	9 34	**9 45**
10 0	1 57	3 50	5 33	7 4	8 19	9 14	9 48	**10 0**
10 15	2 0	3 55	5 42	7 15	8 31	9 28	10 3	**10 15**
10 30	2 3	4 1	5 50	7 25	8 44	9 42	10 18	**10 30**
10 45	2 6	4 7	5 58	7 36	8 56	9 56	10 33	**10 45**
11 0	2 9	4 13	6 7	7 47	9 9	10 10	10 47	**11 0**
11 15	2 12	4 18	6 15	7 57	9 21	10 24	11 2	**11 15**
11 30	2 15	4 24	6 23	8 8	9 34	10 37	11 17	**11 30**
11 45	2 18	4 30	6 32	8 19	9 46	10 51	11 32	**11 45**
12 0	2 20	4 36	6 40	8 29	9 59	11 5	11 46	**12 0**
12 15	2 23	4 41	6 48	8 40	10 11	11 19	12 1	**12 15**
12 30	2 26	4 47	6 57	8 50	10 24	11 33	12 16	**12 30**
12 45	2 29	4 53	7 5	9 1	10 36	11 47	12 30	**12 45**
13 0	2 32	4 58	7 13	9 12	10 49	12 1	12 45	**13 0**
13 15	2 35	5 4	7 22	9 22	11 1	12 14	13 0	**13 15**
13 30	2 38	5 10	7 30	9 33	11 13	12 28	13 14	**13 30**
13 45	2 41	5 16	7 38	9 43	11 26	12 42	13 29	**13 45**
14 0	2 44	5 21	7 47	9 54	11 38	12 56	13 44	**14 0**
14 15	2 47	5 27	7 55	10 5	11 51	13 10	13 59	**14 15**
14 30	2 50	5 33	8 3	10 15	12 3	13 24	14 13	**14 30**
14 45	2 53	5 39	8 12	10 26	12 16	13 37	14 28	**14 45**
15 0	2 56	5 44	8 20	10 36	12 28	13 51	14 43	**15 0**
15 15	2 59	5 50	8 28	10 47	12 41	14 5	14 58	**15 15**
15 30	3 1	5 56	8 37	10 58	12 53	14 19	15 12	**15 30**
15 45	3 4	6 2	8 45	11 8	13 6	14 33	15 27	**15 45**
16 0	3 7	6 7	8 53	11 19	13 18	14 47	15 42	**16 0**
16 15	3 10	6 13	9 2	11 29	13 31	15 1	15 56	**16 15**
16 30	3 13	6 19	9 10	11 40	13 43	15 15	16 11	**16 30**
16 45	3 16	6 25	9 18	11 51	13 55	15 29	16 26	**16 45**
17 0	3 19	6 30	9 27	12 1	14 8	15 42	16 40	**17 0**
17 15	3 22	6 36	9 35	12 12	14 20	15 56	16 55	**17 15**
17 30	3 25	6 42	9 43	12 22	14 33	16 10	17 10	**17 30**
17 45	3 28	6 48	9 52	12 33	14 45	16 24	17 25	**17 45**

ARCS. 18°0'-26°45'	S_1 (Sin. 11°15').	S_2 (Sin. 22°30').	S_3 (Sin. 33°45').	S_4 (Sin. 45°	S_5 (Sin. 56°15').	S_6 (Sin. 67°30').	S (Sin. 78°45').	ARCS. 18°0'-26°45'
18° 0'	3°31'	6°53'	10° 0'	12°44'	14°58'	16°38'	17°39'	18° 0'
18 15	3 34	6 59	10 8	12 54	15 10	16 52	17 54	18 15
18 30	3 37	7 5	10 17	13 5	15 23	17 6	18 9	18 30
18 45	3 40	7 10	10 25	13 16	15 36	17 20	18 23	18 45
19 0	3 42	7 16	10 33	13 26	15 48	17 33	18 38	19 0
19 15	3 45	7 22	10 41	13 37	16 0	17 47	18 53	19 15
19 30	3 48	7 28	10 50	13 47	16 13	18 1	19 7	19 30
19 45	3 51	7 34	10 58	13 58	16 25	18 15	19 22	19 45
20 0	3 54	7 39	11 7	14 8	16 38	18 29	19 37	20 0
20 15	3 57	7 45	11 15	14 19	16 50	18 42	19 52	20 15
20 30	4 0	7 51	11 23	14 30	17 3	18 56	20 6	20 30
20 45	4 3	7 56	11 32	14 40	17 15	19 10	20 21	20 45
21 0	4 6	8 2	11 40	14 51	17 28	19 24	20 36	21 0
21 15	4 9	8 8	11 48	15 1	17 40	19 38	20 51	21 15
21 30	4 12	8 14	11 57	15 12	17 53	19 52	21 5	21 30
21 45	4 15	8 20	12 5	15 23	18 5	20 6	21 20	21 45
22 0	4 18	8 25	12 13	15 33	18 17	20 20	21 35	22 0
22 15	4 20	8 31	12 22	15 44	18 30	20 33	21 49	22 15
22 30	4 23	8 37	12 30	15 55	18 42	20 47	22 4	22 30
22 45	4 26	8 42	12 38	16 5	18 55	21 1	22 19	22 45
23 0	4 29	8 48	12 47	16 16	19 7	21 15	22 33	23 0
23 15	4 32	8 54	12 55	16 26	19 20	21 29	22 48	23 15
23 30	4 35	9 0	13 3	16 37	19 32	21 43	23 3	23 30
23 45	4 38	9 5	13 12	16 48	19 45	21 56	23 18	23 45
24 0	4 41	9 11	13 20	16 58	19 58	22 10	23 32	24 0
24 15	4 43	9 16	13 29	17 9	20 10	22 24	23 47	24 15
24 30	4 46	9 22	13 36	17 20	20 22	22 38	24 2	24 30
24 45	4 49	9 28	13 45	17 30	20 35	22 52	24 17	24 45
25 0	4 52	9 34	13 54	17 40	20 48	23 6	24 32	25 0
25 15	4 55	9 40	14 2	17 51	21 0	23 20	24 45	25 15
25 30	4 58	9 46	14 10	18 2	21 12	23 34	25 0	25 30
25 45	5 1	9 51	14 18	18 12	21 25	23 47	25 15	25 45
26 0	5 4	9 56	14 26	18 24	21 38	24 2	25 30	26 0
26 15	5 7	10 2	14 35	18 34	21 50	24 15	25 45	26 15
26 30	5 10	10 8	14 44	18 44	22 2	24 28	26 0	26 30
26 45	5 13	10 14	14 51	18 55	22 14	24 43	26 15	26 45

Arcs. 27° 0'-32° 45'	S_1 (Sin. 11°15').	S_2 (Sin. 22°30').	S_3 (Sin. 33°45').	S_4 (Sin. 45°).	S_5 (Sin. 56°15').	S_6 (Sin. 67°30').	S_7 (Sin. 78°45').	Arcs. 27° 0'-32° 45'
27° 0'	5° 16'	10° 20'	15 0	19° 6'	22° 26'	24 56	26 28	27° 0'
27 15	5 19	10 26	15 9	19 16	22 40	25 11	26 43	27 15
27 30	5 22	10 32	15 16	19 26	22 52	25 24	26 58	27 30
27 45	5 25	10 38	15 25	19 37	23 4	25 39	27 13	27 45
28 0	5 28	10 42	15 34	19 48	23 16	25 52	27 28	28 0
28 15	5 31	10 48	15 41	19 58	23 29	26 6	27 43	28 15
28 30	5 34	10 54	15 50	20 10	23 42	26 20	27 58	28 30
28 45	5 37	11 0	15 58	20 20	23 54	26 34	28 11	28 45
29 0	5 40	11 6	16 6	20 30	24 6	26 48	28 26	29 0
29 15	5 43	11 12	16 15	20 41	24 18	27 1	28 41	29 15
29 30	5 46	11 18	16 24	20 52	24 32	27 14	28 56	29 30
29 45	5 49	11 23	16 31	21 2	24 44	27 29	29 11	29 45
30 0	5 52	11 28	16 40	21 12	24 56	27 42	29 26	30 0
30 15	5 55	11 34	16 49	21 23	25 9	27 57	29 41	30 15
30 30	5 58	11 40	16 56	21 34	25 22	28 10	29 56	30 30
30 45	5 59	11 46	17 5	21 45	25 34	28 24	30 9	30 45
31 0	6 2	11 52	17 14	21 56	25 46	28 38	30 34	31 0
31 15	6 5	11 58	17 22	22 6	26 0	28 52	30 39	31 15
31 30	6 8	12 4	17 30	22 16	26 12	29 6	30 54	31 30
31 45	6 11	12 10	17 38	22 27	26 24	29 20	31 9	31 45
32 0	6 14	12 14	17 46	22 38	26 36	29 34	31 24	32 0
32 15	6 17	12 20	17 55	22 48	26 48	29 47	31 38	32 15
32 30	6 20	12 26	18 4	22 58	27 2	30 2	31 52	32 30
32 45	6 23	12 32	18 11	23 9	27 14	30 15	32 7	32 45

TABLE

DES LIGNES TRIGONOMÉTRIQUES NATURELLES.

Angle.	Sinus.	Différence pour 10'	Arc.	Tangente.	Cotang.	Sin. vers.	Cosinus.	—	
0°	0,0000		0,0000	0,0000	infini.	0,0000	1,0000	90	
1	0,0175		0,0175	0,0175	57,290	0,0002	0,9998	89	
2	0,0349		0,0349	0,0349	28,636	0,0006	0,9994	88	
3	0,0523		0,0524	0,0524	19,081	0,0014	0,9986	87	
4	0,0698		0,0698	0,0700	14,301	0,0024	0,9976	86	
5	0,0872	0,0029	0,0873	0,0875	11,430	0,0038	0,9962	85	
6	0,1045		0,1047	0,1051	9,514	0,0055	0,9945	84	
7	0,1219		0,1222	0,1228	8,144	0,0075	0,9925	83	
8	0,1392		0,1396	0,1405	7,115	0,0097	0,9903	82	
9	0,1564		0,1571	0,1584	6,314	0,0123	0,9877	81	
10	0,1736		0,1745	0,1763	5,671	0,0152	0,9848	80	1.02
11	0,1908		0,1920	0,1944	5,145	0,0184	0,9816	79	
12	0,2079		0,2094	0,2126	4,705	0,0219	0,9781	78	1.03
13	0,2250		0,2269	0,2309	4,331	0,0256	0,9744	77	
14	0,2419		0,2443	0,2493	4,011	0,0297	0,9703	76	
15	0,2588		0,2618	0,2679	3,732	0,0341	0,9659	75	1.04
16	0,2756	0,0028	0,2793	0,2867	3,487	0,0387	0,9613	74	
17	0,2924		0,2967	0,3057	3,271	0,0437	0,9563	73	1.05
18	0,3090		0,3142	0,3249	3,078	0,0489	0,9511	72	1.05
19	0,3256		0,3316	0,3443	2,904	0,0545	0,9455	71	
20	0,3420		0,3491	0,3640	2,747	0,0603	0,9397	70	1.06
21	0,3584		0,3665	0,3839	2,605	0,0664	0,9336	69	1.07
22	0,3746	0,0027	0,3840	0,4040	2,475	0,0728	0,9272	68	1.08
23	0,3907		0,4014	0,4245	2,356	0,0795	0,9205	67	1.08
24	0,4067		0,4189	0,4452	2,246	0,0865	0,9135	66	1.09
25	0,4226		0,4363	0,4663	2,145	0,0937	0,9063	65	1.10
26	0,4384		0,4538	0,4877	2,050	0,1012	0,8988	64	1.11
27	0,4540	0,0026	0,4712	0,5095	1,963	0,1090	0,8910	63	1.12
28	0,4695		0,4887	0,5317	1,881	0,1171	0,8829	62	1.14
29	0,4848		0,5061	0,5543	1,804	0,1254	0,8746	61	1.145
30	0,5000		0,5236	0,5774	1,732	0,1340	0,8660	60	1.15
31	0,5150	0,0025	0,5411	0,6009	1,664	0,1428	0,8572	59	1.17
32	0,5299		0,5585	0,6249	1,600	0,1520	0,8480	58	1.18
33	0,5446		0,5760	0,6494	1,540	0,1613	0,8387	57	1.19
34	0,5592	0,0024	0,5934	0,6745	1,483	0,1710	0,8290	56	1.20
35	0,5736		0,6109	0,7002	1,428	0,1808	0,8192	55	1.22
36	0,5878		0,6283	0,7265	1,376	0,1910	0,8090	54	1.23
37	0,6018	0,0023	0,6458	0,7536	1,327	0,2014	0,7986	53	1.25
38	0,6157		0,6632	0,7813	1,280	0,2120	0,7880	52	1.27
39	0,6293		0,6807	0,8098	1,235	0,2229	0,7771	51	1.30
40	0,6428	0,0022	0,6981	0,8391	1,192	0,2340	0,7660	50	1.32
41	0,6561		0,7156	0,8693	1,150	0,2453	0,7547	49	1.33
42	0,6691		0,7330	0,9004	1,111	0,2569	0,7431	48	1.35
43	0,6820	0,0021	0,7505	0,9325	1,072	0,2686	0,7314	47	1.37
44	0,6947		0,7679	0,9657	1,036	0,2807	0,7193	46	1.39
45	0,7071		0,7854	1,0000	1,000	0,2929	0,7071	45	1.41
—	Cosinus.	Différence pour 10'.	—	Cotang.	Tangente.	—	Sinus.	Angle.	$\frac{1}{\text{Sinus.}}$

TABLE

POUR CONVERTIR LES RUMBS PRINCIPAUX DU COMPAS ET LEURS FRACTIONS EN DEGRÉS ET MINUTES

QUARTS	DEGRÉS, ETC.		QUARTS.
Nord.	0°	0′	Sud.
N. ½ E. — N. ½ O.	5	37	S. ½ O. — S. ½ E.
N. q. N E. — N. q. N O.	11	15	S. q. S O. — S. q. S E.
N. N E. ½ N. — N. N O. ½ N.	16	52	S. S O. ½ S. — S. S E. ½ S.
N. N E. — N. N O	22	30	S. S O. — S. S E.
N. N E. ½ E. — N. N O. ½ O.	28	7	S. S O. ½ O. — S. S E. ½ E.
N E. q. N. — N O. q. N.	33	45	S O. q. S. — S E. q. S.
N E. ½ N. — N O. ½ N.	39	22	S O. ½ S. — S E. ½ S.
N E. — N O.	45	0	S O. — S E.
N E. ½ E. — N O. ½ O.	50	37	S O. ½ O. — S E. ½ E.
N E. q. E. — N O. q. O.	56	15	S O. q. O. — S E. q. E.
E. N E. ½ N. — O. N O. ½ N.	61	52	O. S O. ½ S. — E. S E. ½ S.
E. N E. — O. N O.	67	30	O. S O. — E. S E.
E. N E. ½ E. — O. N O. ½ O.	73	7	O. S O. ½ O. — E. S E. ½ E.
E. q. N E. — O. q. N O.	78	45	O. q. S O. — E. q. S E.
E. ½ N. — O. ½ N.	84	22	O. ½ S. — E. ½ S.
Est. — Ouest.	90	0	Ouest. — Est.

APPENDICE

Je réunis ici quelques notes théoriques qui n'auraient pas été à leur place dans l'ouvrage et ne sont pas d'ailleurs indispensables à l'intelligence du texte.

NOTE I (v. p. 89 et N VIII).

Détermination du moment magnétique et du moment d'inertie d'une rose de compas.

Nous pensons qu'il peut être utile de savoir déterminer ces deux quantités dont nous avons montré l'importance pratique. Voici, parmi les diverses méthodes que l'on peut employer, celle qui nous paraît la plus simple; nous l'emprnntons à l'excellente brochure de M. Caspari, dont nous avons déjà parlé. (*Considérations sur le compas.*)

1° On suspend la rose à un fil sans torsion, on l'écarte du méridien magnétique et on la laisse ensuite osciller librement; quand l'amplitude de l'oscillation, c'est-à-dire la *moitié* de l'arc total parcouru par un point de la rose, est égale ou inférieure à 30 degrés, on note la valeur α de cette amplitude et l'heure correspondante. Puis, on compte un certain nombre d'oscillations de l'aiguille et on note l'heure à laquelle se termine la dernière. La différence des heures, divisée par le nombre des oscillations observées, donne la durée d'une oscillation, c'est-à-dire la quantité t_1 de la formule de la page 30. De t_1 on passe facilement à la durée de l'oscillation infiniment petite t qui nous est nécessaire, au moyen des nombres suivants extraits d'une table de M. Daroudeau insérée dans le *Guide du marin* (tome II, p. 376).

Si $\alpha = 20°$ $\quad t_1 = t \times 1{,}008$

Si $\alpha = 25°$ $\quad t_1 = t \times 1{,}012$

Si $\alpha = 30°$ $\quad t_1 = t \times 1{,}017$.

2° On fait les mêmes observations, et on note la valeur que prennent ces diverses quantités, après avoir lesté la rose d'une masse additionnelle dont le moment d'inertie, par rapport à l'axe d'oscillation, soit facile à déterminer. Soit I' le moment d'inertie de la masse additionnelle.

On observe ainsi t'_1 et α'_1, ce qui nous donne une quantité t' analogue t. à

Désignons $2ml$ par M et reportons-nous à la formule 27, (p. 90), il est évident que la première expérience donne $t^2 = \frac{I}{MH}\pi^2$

et la seconde. $t'^2 = \frac{I + I'}{MH}\pi^2$

On tire de ces deux équations, pour la valeur de nos deux inconnues I et M :

$$I = I'\frac{t^2}{t'^2 - t^2} \qquad \text{et} \qquad M = \frac{\pi^2 I'}{H(t'^2 - t^2)}$$

Le problème est donc ramené à déterminer I'.

Si la masse additionnelle employée est un cercle de cuivre de rayon R exprimé au moyen du mètre pris pour unité, de poids P exprimé au moyen du kilogramme pris pour unité, on a $I' = \frac{P}{g}R^2$, g étant l'accélération due à la pesanteur exprimée au moyen du mètre et de la seconde, soit très approximativement 9,81.

Si la masse additionnelle se compose d'une règle de bois, de poids p, de section uniforme et suffisamment petite, de longueur 2λ, on aura une valeur suffisamment approchée de son moment d'inertie, en le prenant égal à $\frac{p}{g}\frac{\lambda^2}{4}$ Soit p' le poids de chacune des masses additionnelles, λ' leur distance commune au centre, le moment d'inertie de ces masses sera $\frac{2p'}{g}\lambda'^2$, et l'on aura au total $I' = \frac{\frac{1}{4}p\lambda^2 + 2p'\lambda'^2}{g}$.

NOTE II (v. p. 103).

Sur l'angle de 54°55'

Poisson a donné les formules fondamentales qui expriment les composantes de la force magnétique exercée sur le pôle n ou rouge de l'aiguille aimantée par une masse de fer doux aimantée par l'influence terrestre. Malheureusement, leur intégration offre de telles difficultés, qu'on n'a pu les surmonter que dans le petit nombre de cas où le corps de fer doux a une forme géométrique déterminée et très simple. Ce sont ces formules qui servent de base à cet ouvrage ; mais, en les développant et en les transformant, Archibald Smith avait dégagé de suite des résultats applicables à la pratique (v. *Philosophical transactions of the Royal Society of London*, 1865), par exemple celui-ci, que l'effet de la cuirasse des navires de guerre est de diminuer l'erreur due à la bande, sauf dans le cas où le compas est placé beaucoup plus haut que la partie supérieure des plaques de cuirasse. Il y était arrivé en intégrant les équations qui se rapportent au cas de tiges transversales de fer doux, s'étendant d'un bord à l'autre du navire, comme des baux. De ces expressions, il avait tiré celles des différents paramètres ou coefficients a, b, c.... λ, $\mathfrak{D}$, introduits par des barres de fer doux longitudinales ou transversales. En appelant, conformément aux notations choisies dans cet ouvrage, r la coordonnée de l'extrémité supérieure d'une tige de fer verticale et z la distance de cette même extrémité au centre de la rose, on voit que le terme en k est positif ou négatif, suivant que $\frac{z}{r}$ est plus grand ou plus petit que $\frac{1}{\sqrt{3}}$, c'est-à-dire suivant que le centre de la tige est au dedans ou en dehors du cône droit ayant pour sommet le centre de la rose et pour angle à ce sommet 54°55′ (dont le cosinus est égal à $\frac{1}{\sqrt{3}}$), ce qui explique la cinquième prescription de la page 102.

Voyez encore, au sujet de cet angle, la note sur les *Sphères compensatrices.*

NOTE III (v. p. 200).

Sur les sphères compensatrices.

Le rôle considérable des sphères dans la méthode de compensation adoptée par Sir W. Thomson rendra peut-être intéressante pour nos lecteurs la connaissance des paramètres et coefficients qu'introduit dans les formules un corps de forme semblable.

Prenons d'abord le cas d'une sphère pleine, de rayon p, telle que la distance de son centre à celui de la rose soit r, et que α, β, γ soient les angles que la ligne joignant ces deux centres fait respectivement avec chacun des axes de coordonnés $o\,x$, $o\,y$, $o\,r$, définis p. 54.

En posant :

$$M = \frac{\frac{4\pi}{3}\varkappa}{1+\frac{4\pi}{3}\varkappa}\,\frac{p^3}{r^3}.$$

$\varkappa$ étant un coefficient dont la valeur varie de 10 à 40 pour les différentes sortes de fer doux, on aura pour les différents paramètres introduits par la sphère :

$$a = M\,(3\cos^2\alpha - 1) \qquad e = M\,(3\cos^2\beta - 1)$$
$$b = d = M \,.\, 3\cos\alpha\cos\beta \qquad f = h = M\,3\cos\beta\cos\gamma$$
$$c = g = M \,.\, 3\cos\alpha\cos\gamma \qquad k = M\,(3\cos^2\gamma - 1)$$

et par conséquent (v. p. 63) :

$$\lambda = 1 + \frac{M}{2}(1 - 3\cos^2\gamma) \qquad \mathfrak{C} = \frac{M}{\lambda}\,3\cos\beta\cos\gamma\,\mathrm{tang}\,\theta$$

$$\mathfrak{A} = 0 \qquad \mathfrak{D} = \frac{M}{\lambda}\cdot\frac{3}{2}(\cos^2\alpha - \cos^2\beta)$$

$$\mathfrak{B} = \frac{M}{\lambda}\,3\cos\alpha\cos\gamma\,\mathrm{tang}\,\theta \qquad \mathfrak{E} = \frac{M}{\lambda}\,3\cos\alpha\cos\beta$$

Ainsi, quelle que soit la place occupée par une sphère, elle augmente le coefficient λ et donne un $-k$ si $\cos\gamma < \frac{1}{\sqrt{3}}$, au contraire, elle diminue λ et donne un $+k$, si $\cos\gamma$ est plus grand que $\frac{1}{\sqrt{3}}$ c'est-à-dire si γ est $< 54°45'$: et on se trouve dans l'un ou l'autre cas, suivant que le centre de cette sphère est en dehors ou en dedans du cône déjà considéré dans la note 2.

$\mathfrak{E}$ est en général négligeable et le seul coefficient de la déviation quadrantale qu'il faille considérer est $\mathfrak{D}$, qui est presque toujours positif. Le $\mathfrak{D}$ introduit par la sphère est positif ou négatif, il augmente ou diminue la déviation quadrantale due au navire suivant que α est plus grand ou plus petit que β. Si on trace, par le centre de la rose, deux droites horizontales inclinées de 45 degrés sur l'axe longitudinal du bâtiment, on voit que $\cos^2\alpha$ est plus petit que $\cos^2\beta$ toutes les fois que le centre est dans l'un des quadrants de droite ou de gauche, et qu'il est au contraire plus grand quand le centre se trouve dans un des quadrants contenant l'axe du navire.

Si on place les centres de deux sphères égales, de même intensité magnétique, de part et d'autre du centre du compas à égale distance de ce centre et sur le même niveau, on aura d'après les valeurs de α et β pour l'ensemble de ces deux corps $\lambda = 1 + \mathrm{M}$ et $\mathfrak{D} = -\frac{3\mathrm{M}}{1+\mathrm{M}}$ ou approximativement

$$= \frac{3}{1 + \left(\frac{r}{p}\right)^3}.$$

Cette dernière égalité, mise sous la forme $r = p\sqrt[3]{\frac{3}{\mathfrak{D}} - 1}$, nous donne la distance à laquelle on doit placer les centres des deux sphères pleines, pour corriger une déviation quadrantale égale à $\mathfrak{D}$.

Quand la sphère est creuse et qu'on appelle q le rayon de la sphère intérieure, si $\varkappa$ est grand et $1 - \frac{q}{p}$ petit, ce que nous avons dit plus haut subsiste à condition de remplacer M par l'expression

$$\mathrm{M}\,\frac{1 - \frac{q}{p}}{1 - \frac{q}{p} + \frac{3}{8\pi\varkappa}}.$$

Il en résulte que si $\varkappa$ est égal à 12 et l'épaisseur de la couche sphérique égale au centième de son rayon extérieur, l'effet produit par elle sera environ la moitié de l'effet exercé par la sphère pleine. Il en sera de même si $\varkappa$ est égal à 36 et que l'épaisseur de la couche soit réduite au trois-centième du rayon. On peut admettre que l'effet d'une muraille de fer de $1^{\mathrm{m}},20$ de diamètre et de 10 centimètres et demi d'épaisseur est à peu près le tiers de celui exercé par une masse compacte de fer de même dimension.

L'effet sur le compas d'une tourelle en fer destinée à abriter de la mousqueterie et de 3 mètres de diamètre sur 10 centimètres d'épaisseur, sera approximativement le même que si la tourelle était faite d'un seul bloc de fer, placée sur l'avant du compas elle augmentera λ et $\mathfrak{D}$ en donnant un $+a$ et un $-e$ (*Ph. Trans.*, 1865, p. 317).

NOTE IV (v. p. 219).

Sur la fraction de l'erreur due à la bande corrigée par la compensation préalable d'un degré de déviation quadrantale.

On peut démontrer ainsi qu'il suit le résultat énoncé p. 219 :

Appelons δa, δe, δk les variations que les correcteurs de fer doux font subir aux paramètres a, e, k; en particulier, si la section des correcteurs est carrée ou circulaire, on a $\delta a = \delta k$.

Soit $\delta \mathfrak{D}$ la variation correspondante de $\mathfrak{D}$. Il est facile de trouver la variation δJ du coefficient J en fonction de $\delta \mathfrak{D}$ et de $\frac{\delta a}{\delta e}$.

Prenons l'équation (58) de la page 187, elle se met aisément sous la forme :

$$\lambda (J + 2 \mathfrak{D} \operatorname{tang} \theta) + (\mu - 1 - a) \operatorname{tang} \theta = 0,$$

et donne par différentiation :

$$\frac{\delta J + 2 \operatorname{tang} \theta \,.\, \delta \mathfrak{D}}{J + 2 \mathfrak{D} \,.\operatorname{tang} \theta} + \frac{\delta \lambda}{\lambda} = 0.$$

Or
$$\lambda \mathfrak{D} = \frac{1}{2}(a - e) \qquad \text{et} \qquad \lambda = 1 + \frac{1}{2}(a + e);$$

et
$$\frac{\delta \,.\, \lambda \mathfrak{D}}{\delta \lambda} = \frac{\delta \lambda}{\delta \lambda} \,.\, \mathfrak{D} + \frac{\lambda}{\delta \lambda} \,.\, \delta \mathfrak{D}.$$

Ce qui, toutes réductions faites, donne finalement :

$$\delta J + 2 \operatorname{tang} \theta \,.\, \delta \mathfrak{D} - \frac{(J + 2 \mathfrak{D} \operatorname{tang} \theta)\, \delta \mathfrak{D}}{\dfrac{\delta a - \delta e}{\delta a + \delta e} - \mathfrak{D}} = 0.$$

Si le correcteur est une sphère, on a $\delta e = -2 \delta a$, et par suite $\frac{\delta a - \delta e}{\delta a + \delta e} = 3$.

En tenant compte des valeurs de J et $\mathfrak{D}$ qui sont toujours faibles, (car si $\mathfrak{D} = 10$ degrés, valeur qu'il dépasse rarement, $\mathfrak{D} = \frac{10}{57,3}$) on voit qu'on peut négliger le dernier terme de l'équation précédente, par conséquent on aura $dJ + 2 \operatorname{tang} \theta \,.\, \delta \mathfrak{D} = 0$, ce qui montre que pour $\delta \mathfrak{D} = 1$ degrés on a approximativement $dJ = -2 \operatorname{tang} \theta$.

Pour les côtes Nord-Ouest et Nord de la France $\operatorname{tang} \theta = 2{,}60$ environ, ce qui justifie l'affirmation de la page 219.

NOTE V (v. p. 228).

Sur le miroir azimutal.

J'ai voulu donner p. 225 l'évaluation des erreurs de relèvement commises avec le miroir azimutal sans introduire une seule formule nouvelle, et j'ai été conduit par cela même à une explication qui ne me satisfait point parce que je la trouve longue et diffuse. Si le lecteur veut bien consentir à employer quelques formules des plus simples voici une théorie très simple et très élégante du miroir azimutal due à M. Moutier, Répétiteur à l'École Polytechnique, l'auteur bien connu du résumé le plus court, mais en même temps le plus précis et le plus clair, qui ait été publié sur la Théorie mécanique de la Chaleur.

Voici sa démonstraiion :

Deux astres sont à l'horizon à une distance d de l'observateur. Si on appelle l la distance des deux astres, l'observateur voit la droite qui joint les deux astres sous l'angle :

$$\omega = \frac{l}{d}.$$

On regarde les images des deux astres données par un miroir plan, les images des deux astres sont à la distance $l' = l$, à une distance de l'observateur $d' = d$, l'observateur voit donc la droite qui joint les deux images sous l'angle

$$\omega' = \frac{l'}{d'} = \omega.$$

Pour mesurer ω, on vise deux divisions de la rose de façon à faire coïncider les directions des rayons réfléchis pour chaque astre avec la direction des rayons réfractés venant de chaque point de la rose.

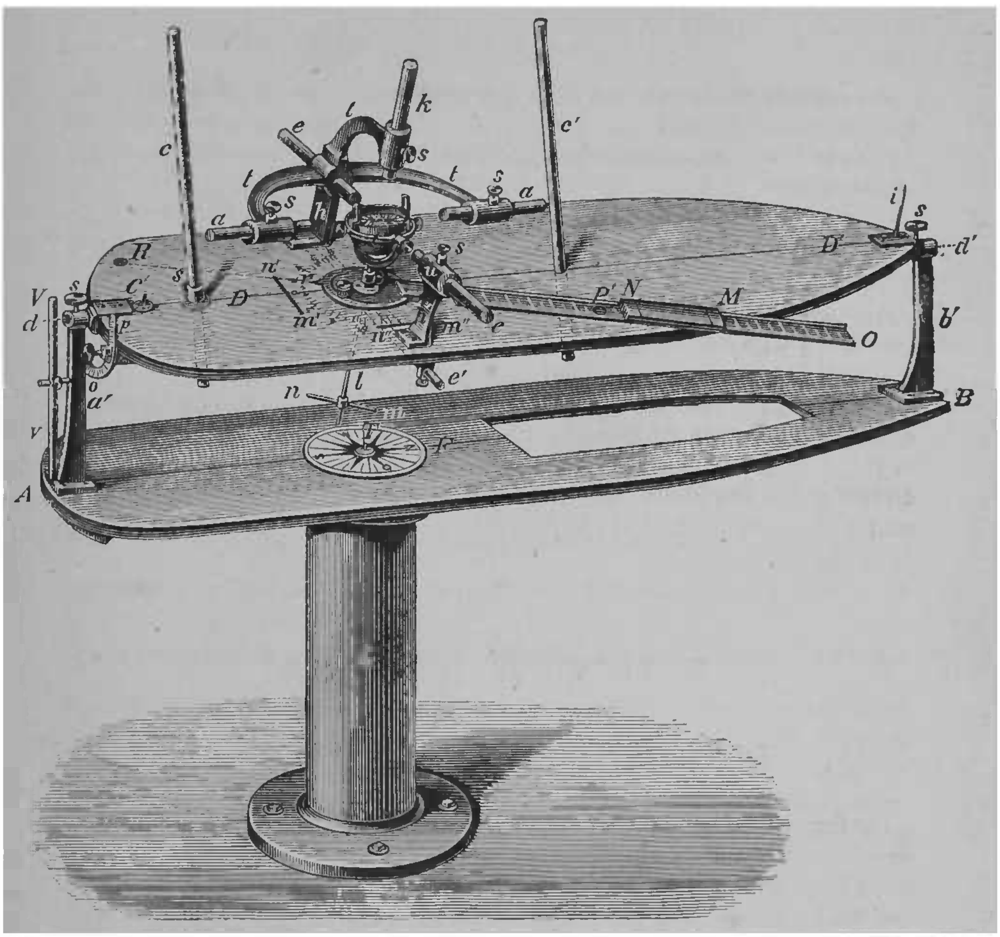
Soit λ la distance de deux divisions de la rose, et δ la distance de l'une de ces divisions au centre optique de la lentille. L'œil supposé placé au centre optique de la lentille voit l'intervalle λ des deux divisions de la rose sous l'angle $\frac{\lambda}{\delta}$. Cet angle est égal à ω' et par suite à ω.

D'un autre côté, si on appelle r le rayon de la rose, l'angle au centre de la rose qui correspond à l'arc λ a pour valeur $\frac{\lambda}{r}$. Il faut que cet angle soit égal à ω, c'est à dire à $\frac{\lambda}{\delta}$, ce qui exige que $r = \delta$. Il faut donc que le rayon de la rose soit égal à la distance du centre optique de la loupe à un objet placé dans des conditions telles que l'image virtuelle de cet objet soit à la distance de la vision distincte. Cette distance δ n'est pas exactement la distance focale principale des loupes, elle ne lui serait égale que si la distance de la vision distincte était égale à l'infini.

NOTE VI (V p. 61)

Appareil du docteur Neumayer.

La figure ci-dessous au 1/20 représente le croquis de cet appareil qui peut tourner tout entier autour d'un axe vertical *s*. La direction magnétique de l'axe AB ou du cap du navire est donnée par la rose F.



La planchette supérieure DD' qui représente le pont du navire peut tourner autour de l'axe horizontal *dd'* de façon à ce que l'on puisse étudier dans tous ses détails l'erreur due à la bande.

Le barreau aimanté NM mobile sur la règle O qui tourne autour du centre du compas donne les deux composantes P et Q du magnétisme permanent dont l'angle tribord déterminé par le rapport de Q à P qui donne la tangente de cet angle se compte sur la circonférence divisée au pied du compas.

Appareil du Bureau de Navigation des États-Unis. — M. Frank Cross a fait pour l'arsenal de Washington un petit modèle de bateau qui porte le nom de *Scoresby* en mémoire du savant dont l'énergie et la persévérance ont tant contribué au progrès des études faites sur le magnétisme des navires.

Sa longueur est de 2 mètres, sa largeur et sa profondeur de 1 mètre. Il se compose essentiellement d'une carcasse formée de l'étrave de la quille et de l'étambot, reliées par trois planches en bois représentant les différents ponts et dont les deux inférieures peuvent être mises à des hauteurs variables. Le modèle est mobile autour d'un axe vertical passant derrière l'étambot, l'avant se meut sur une circulaire de bronze.

Sur le pont supérieur se trouvent les aimants et les tiges de fer doux dont nous avons parlé.

On peut fixer aux planches représentant les ponts des plaques de fer qu'on frappe et qu'on martèle et étudier ainsi l'influence du cap de construction. De plus des dispositions spéciales permettent de faire donner au modèle une bande de 45 degrés et de lui imprimer un ample et rapide mouvement de roulis.

Avec cet appareil le lieutenant-commander T.-A. Lyons de la marine des États-Unis a pu mettre en évidence tous les résultats de la théorie des déviations.

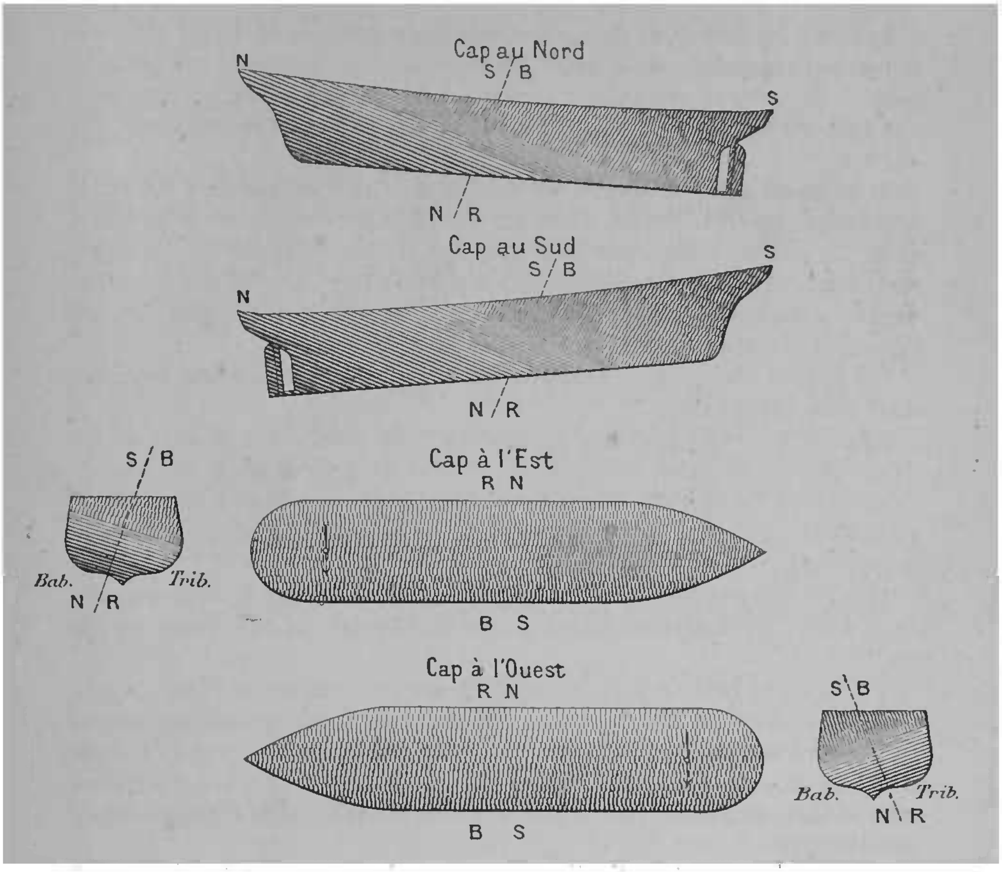
Il a consigné tout ce travail ainsi que ses recherches sur l'état magnétique du croiseur le *Ranger* dans un *Mémoire sur le magnétisme des navires en fer et en acier* qui porte le n° 17 et a été publié en 1884 par le Bureau de Navigation des États-Unis, dirigé par le commodore Walker. Ce travail est l'un de ceux qui mettent le plus clairement en relief tous les principes de la théorie.

NOTE VII (V. p. 61-75-193)

Influence du cap de construction et de la route.

Les figures ci-dessous rendent compte, sans qu'il soit besoin d'explication, de l'influence sur l'aiguille aimantée du cap de construction ou d'une route longtemps suivie. Le fluide rouge est représenté par les hachures droites. Le fluide bleu par les hachures brisées. La teinte plus ou moins foncée indique le plus ou moins d'intensité des fluides. La droite inclinée représente la direction de l'aiguille d'inclinaison dans le méridien magnétique.

Il serait souvent très aisé de prévoir ce qu'on appelle les déviations anormales du compas sur une route quelconque donnée, si on faisait pour cette route un croquis semblable, en ayant soin de placer la ligne qui représente l'aiguille d'inclinaison conformément à la valeur de l'inclinaison au lieu où l'on se trouve et de se rappeler que l'intensité des deux fluides



hypothétiques du magnétisme induit est *maxima* dans les parties du bâtiment les plus rapprochées du pôle terrestre de même nom.

NOTE VIII

Action des aimants sur l'aiguille aimantée.

1° Effet d'un petit aimant sur une molécule magnétique placée sur le prolongement de son axe.

En appelant m la masse magnétique de chacun des pôles de l'aimant, m' la masse de la molécule magnétique, d la distance de cette molécule au centre du barreau, l la longueur de l'aimant, la loi des actions des forces magnétiques donne en supposant que l est assez petit par rapport à d pour qu'on puisse négliger les termes en l^3.

$$F = \frac{2mm'l}{d^3}$$

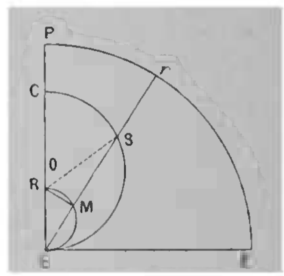
2° La molécule magnétique se trouve sur la perpendiculaire élevée au milieu de la longueur du barreau et à une distance d.

Dans ce cas, $f = \frac{F}{2} = \frac{mm' l}{d^3}$.

Application à la terre. — Si nous supposons au centre de la terre un petit aimant dirigé suivant un de ses diamètres, la force exercée par cet aimant sur une molécule magnétique située au point d'intersection de la terre avec la direction de l'aimant, sera le double de l'effet produit par le même aimant sur cette même molécule quand elle est située en un des points du grand cercle, intersection de la surface terrestre avec le plan passant par le milieu de l'aimant et perpendiculaire à sa direction.

3° Trouver l'effet d'un petit aimant sur une molécule magnétique placée d'une manière quelconque à la surface terrestre.

Décomposons le barreau R B en deux autres, R M et B M ayant en M des masses magnétiques bleues et rouges égales à celles du barreau R B et par suite se neutralisant. D'après ce que nous avons dit précédemment, et en supposant R B très petit par rapport à la distance R r, la force exercée par l'aimant R M sur r, peut être représentée par R M, la force exercée par l'aimant B M sur r, peut être représentée par M S $=$ 2 B M. La résultante totale est R S.



La latitude magnétique de r est r B E soit L.

On aura donc :

force horizontale $=$ R M $=$ R B cos L,

force verticale $=$ S M $=$ 2 R B sin L,

force totale $=$ R S $=$ R B $\sqrt{1 + 3 \sin^2 L}$.

Corollaire. — Trouver la direction de la force exercée par un petit aimant sur une molécule magnétique placée dans une position quelconque r.

Joignez la molécule r au centre C de l'aimant. Sur Cr prenez C M $= \frac{1}{3}$ Cr. Par M menez une perpendiculaire à Cr. Soit T l'intersection de cette droite avec la direction de l'aimant prolongé, r T est la direction de la force cherchée.

Déviation imprimée à une aiguille par un aimant. — En supposant l'aiguille infiniment petite et l'aimant perpendiculaire à la direction initiale de l'aiguille, c'est-à-dire telle que l'on puisse négliger sa longueur par rapport à la distance d qui la sépare de l'aimant, on trouve aisément en faisant un croquis et en appelant R la résultante des deux forces émanées des deux pôles de l'aimant sur un même pôle de l'aiguille que

$$\text{tang}\ \omega = \frac{R}{m' H}.$$

En appelant m' la masse magnétique du pôle de l'aiguille, H la force horizontale terrestre au lieu donné ω la déviation imprimée par l'aimant à l'aiguille, et en supposant que cette déviation ait un très petit nombre de degrés, quatre ou cinq environ.

En appelant l la longueur de l'aimant $R = mm' \frac{l}{d^3}$

On a donc $\tang \omega = \frac{ml}{d^3 H}$

La formule précédente nous donne un moyen facile pour obtenir le moment magnétique d'un barreau. Il suffit pour cela d'observer ω et de connaître d et H. Il ne faut pas oublier que d doit être exprimé en centimètres et H en dynes. C'est-à-dire qu'il faut, pour avoir la valeur de H en un lieu donné, multiplier le nombre donné par la carte par 0,17.

NOTE IX

Moments magnétiques des aimants.

Dans la note I, nous avons donné un moyen pour obtenir le moment magnétique absolu d'une aiguille aimantée de longueur donnée et dont les pôles ont des masses magnétiques égales à m. On n'obtient ainsi qu'une approximation très grossière. On peut se faire encore une idée approchée du moment absolu d'une aiguille par les considérations suivantes.

Supposons qu'une substance soit uniformément aimantée en tous ses points et qu'on taille un barreau dans cette substance. Si on fait varier la section et la longueur de ce barreau, il est clair que, d'après notre hypothèse, le rapport $\frac{\text{moment magnétique du barreau}}{\text{volume du barreau}}$ est une constante.

On appelle cette constante *intensité d'aimantation* de la substance.

Cette constante est *maxima* dans le cas de tiges très minces d'acier, très bien trempées, dont la longueur est au moins de 50 fois le diamètre.

On a trouvé alors qu'un gramme de ces tiges très minces conserve un maximum de magnétisme permanent qu'on peut évaluer à 100 unités c. g. s. de moment par gramme d'acier. L'unité c. g. s. de moment est le moment d'un aimant dont la longueur serait de 1 centimètre et dont l'intensité des pôles serait égale à l'unité, c'est-à-dire serait telle que deux pôles semblables, placés à une distance de 1 centimètre, se repousseraient avec une force égale à une dyne.

La dyne est la force qui, agissant sur une masse de 1 gramme pendant une seconde, accroîtrait sa vitesse de 1 centimètre par seconde.

D'après cette définition, on voit que, quand une force est exprimée en dynes, il faut la diviser par la valeur de g, en centimètres, dans le lieu donné pour avoir son expression en grammes.

Le volume s'obtenant en divisant le poids par la densité, et la densité de l'acier étant 7,85, on voit que si on a

$$\frac{\text{moment magnétique}}{\text{poids en grammes}} = 100 \text{ on a } \frac{\text{moment magnétique}}{\text{volume en c.c.}} = 785$$

dans le cas particulier du maximum où nous nous sommes placés.

La dernière égalité nous donne évidemment pour la masse magnétique de l'un des pôles du barreau $m = 785 \times S$.

S étant la section en centimètres carrés.

Le moment magnétique d'une tige d'acier exprimé en dynes est égal au poids en grammes multiplié par 100 : et si au lieu de la dyne on veut employer le gramme, il faut diviser ce produit par la valeur de g exprimée en centimètres.

A Paris, où $g = 981$, on a donc approximativement pour le moment magnétique d'une tige d'acier très longue 0,1 × poids en grammes.

Le moment magnétique directeur de la même tige, dans un lieu où la force horizontale est H, c'est 0,1 × poids en grammes × H.

H étant exprimée en dynes comme nous l'avons dit à la fin de la note VIII.

A Paris, où $H = 0,194$, nous aurons approximativement : moment magnétique directeur = 0,02 × poids en grammes.

Mais il ne faut pas oublier que le facteur 0,02 suppose que nous sommes dans un lieu déterminé, Paris, et de plus que l'intensité d'aimantation est égale à 100. Si elle était égale à un autre nombre quelconque a, il faudrait multiplier l'expression donnée par le centième de a.

On voit déjà ici combien est grande l'influence de l'erreur de frottement, et de la plus petite variation dans la force directrice de l'aiguille, puisque, quand cette dernière est *maxima*, le moment directeur de l'aiguille n'est que les 2 centièmes de son poids. Aussi dans la pratique est-il préférable d'égaler le moment magnétique directeur aux 16 millièmes du poids en grammes environ, en supposant l'intensité d'aimantation égale à 80.

Pour les barreaux aimantés dont la longueur est comprise entre 15 et 30 fois le diamètre, l'intensité d'aimantation varie de 20 à 40 suivant les sortes d'acier et le diamètre. Il faut donc, en la prenant à 30 en moyenne, compter que le moment magnétique directeur d'un semblable barreau sera égal environ aux 6 millièmes de son poids. Pour les barreaux tels que la longueur est égale à 15 fois seulement le diamètre, le moment magnétique directeur est égal à environ 4 millièmes et demi du poids en grammes.

PLANCHE II

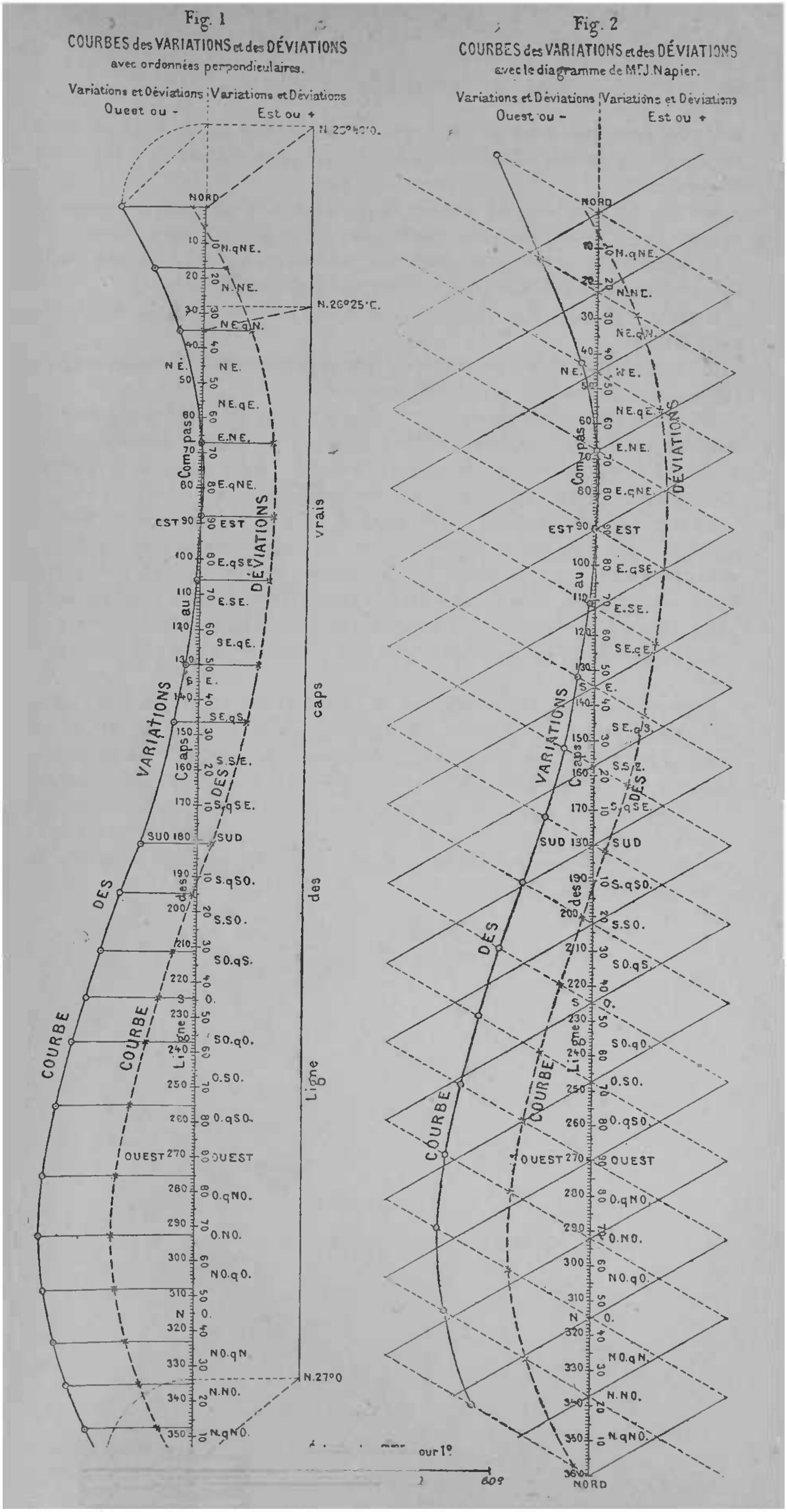
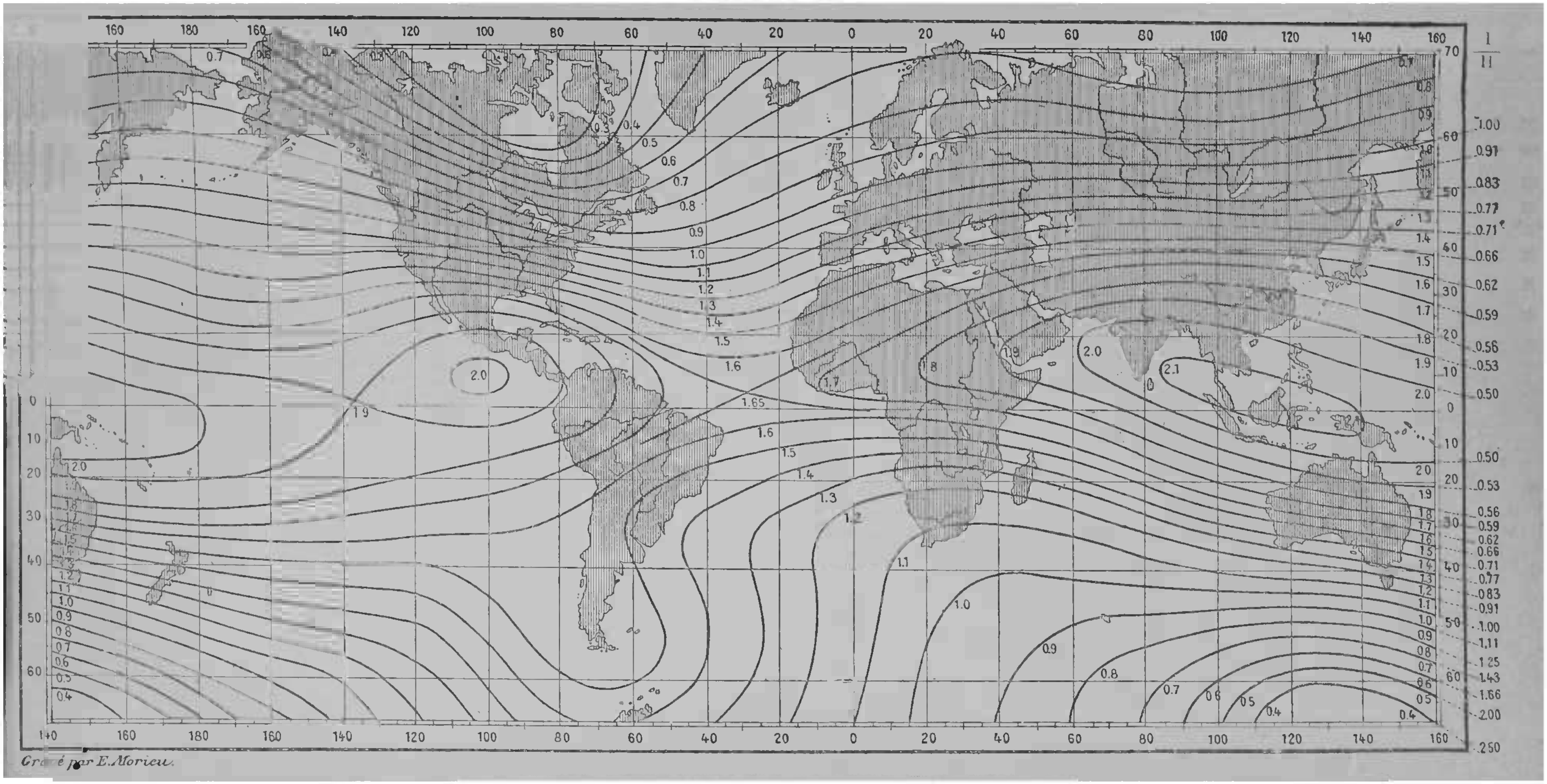


Fig. 1
COURBES des VARIATIONS et des DÉVIATIONS
avec ordonnées perpendiculaires.
Variations et Déviations Ouest ou -
Variations et Déviations Est ou +
NORD
EST
SUD
OUEST
COURBE DES VARIATIONS
COURBE DES DÉVIATIONS
Ligne des caps au Compas
Ligne des caps vrais
N.26°25'E.
N.27°0
Fig. 2
COURBES des VARIATIONS et des DÉVIATIONS
avec le diagramme de M.J. Napier.
Variations et Déviations Ouest ou -
Variations et Déviations Est ou +
NORD
EST
SUD
OUEST
COURBE DES VARIATIONS
COURBE DES DÉVIATIONS
Ligne des caps au Compas

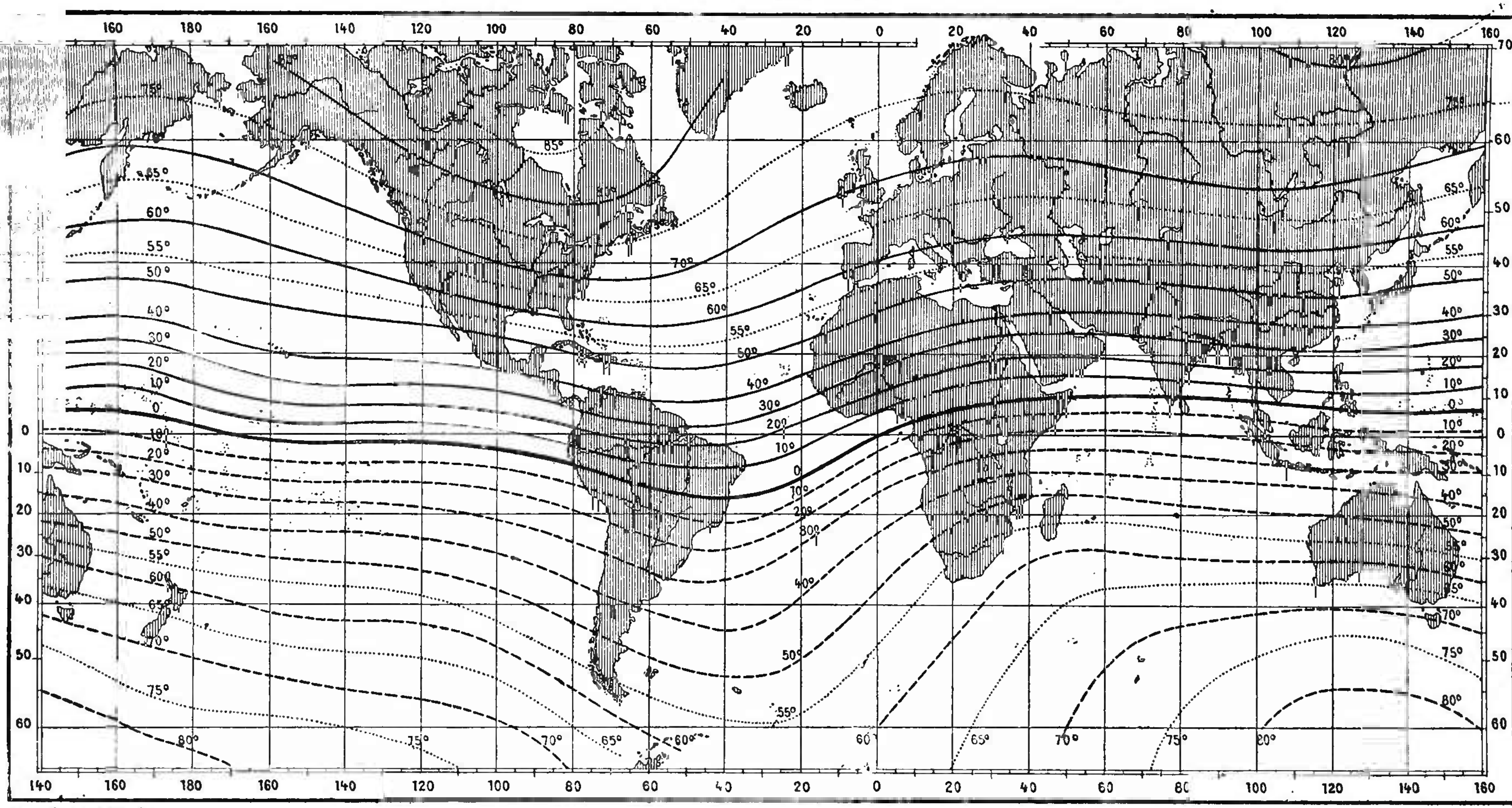
PLANCHE III



COURBES D'ÉGALE FORCE HORIZONTALE [H].

Carte tirée du Manuel des Déviations publié par l'Amirauté anglaise.

PLANCHE IV

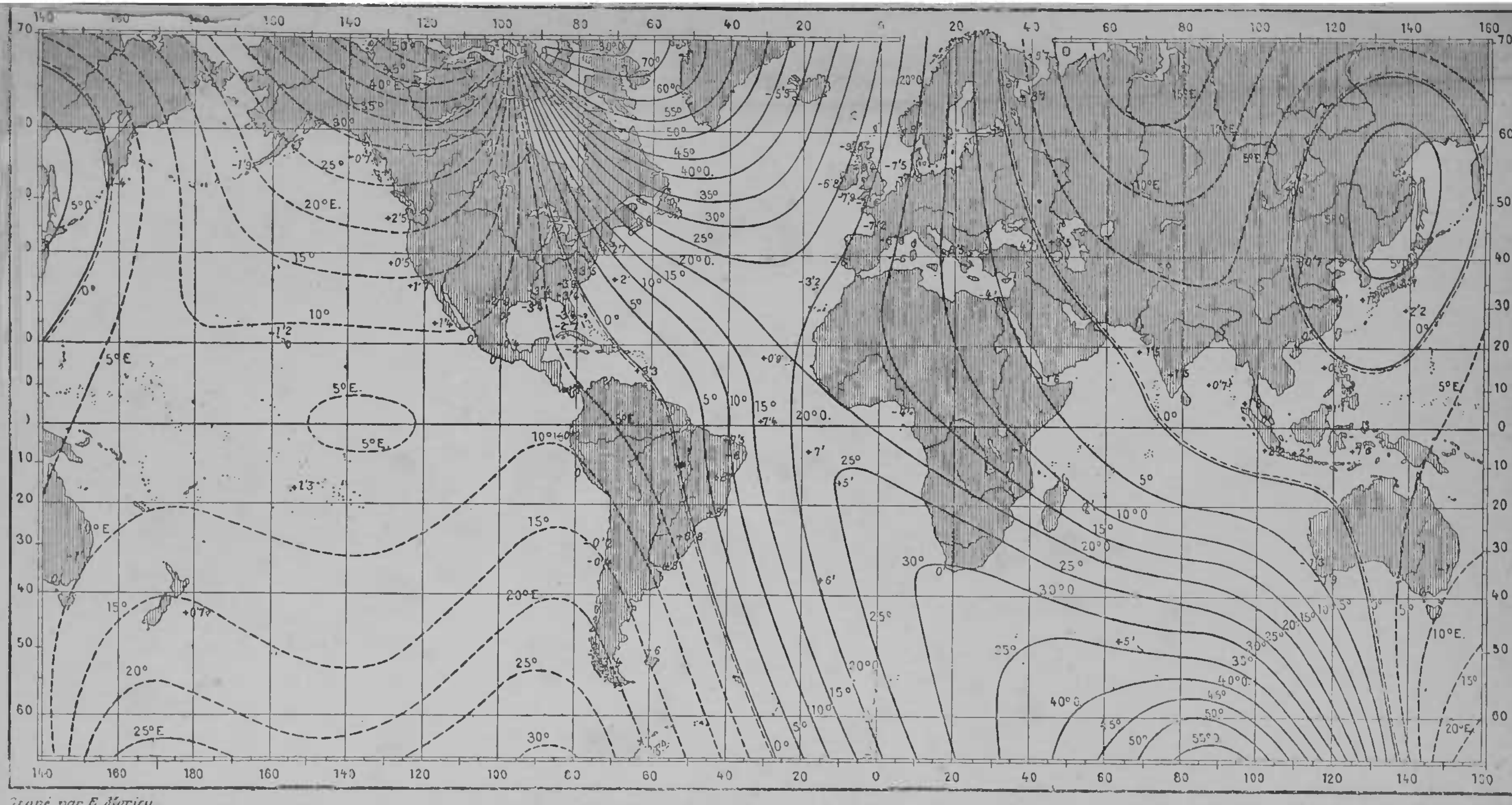


Gravé par E. Morieu.

COURBES D'ÉGALE INCLINAISON MAGNÉTIQUE.

Carte tirée du Manuel des Déviations des Compas publié par l'Amirauté anglaise.

PLANCHE V



COURBES D'ÉGALE DÉCLINAISON MAGNÉTIQUE, POUR 1880

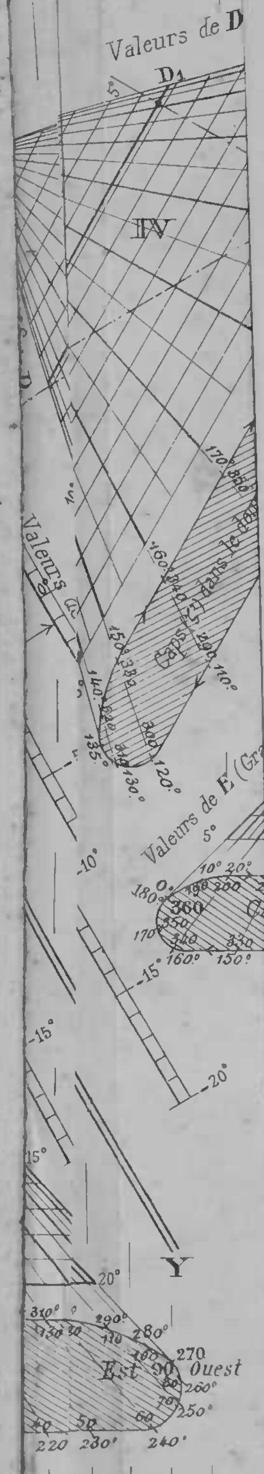
Réduction de la Carte dressée d'après les ordres de l'Amirauté anglaise, par M. le Staff-Commander E. W. Creak.

Les chiffres de cette carte, précédés du signe + ou — et marqué du signe caractéristique des minutes, indiquent les variations *annuelles* de la Déclinaison aux endroits qu'elles occupent et doivent être appliqués, comme correction, avec leurs signes aux valeurs absolues de la Déclinaison.

PASAU MOYEN

$\zeta' + \mathrm{E}\cos\ \zeta'$

$\sin 2\zeta' + \mathrm{E}\cos\ 2\ \zeta'$



a

d

ti

C

p

TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

Voyez les additions de la seconde édition dans la table analytique.

A

A, coefficient constant, 65; — sa faible valeur ordinaire, 66; — influence sur lui de la compensation de E, sa correction possible, 198.

$\mathfrak{A}$, coefficient constant, 63, 156, 160; — sa valeur en fonction des paramètres dûs au fer doux, 63.

a, paramètre dû au fer doux, 55-57 et pl. I, 56, 160.

Accélération, 2.

Accélération angulaire, 15.

Action directrice de la terre sur les aimants, 22.

Action des aimants sur l'acier, 23.

— — sur le fer doux, 23.

— — sur l'aiguille aimantée, 45-51.

Action du fer doux sur l'aiguille aimantée, 52.

Action des aimants sur la force directrice de l'aiguille, 49.

Action du fer doux sur cette force, 59.

Action de la chaleur sur les aimants, 24.

Aiguille d'inclinaison de sir W. Thomson, 39, 222.

Aimantation du fer doux par l'action de la terre, 24, 52.

Aimants naturels et artificiels, 18.

Airy (Sir G), ses recherches sur la compensation des compas, XVIII, 196; — sa règle fondamentale, 266.

Ancien matériel de compas, 114.

Angle au pôle, 114.

Angle horaire, 114.

— tribord, 158.

Archibald Smith, ses travaux, XXX.

Axes choisis pour la décomposition des forces magnétiques, 53.

Azimut (tables d'), de M. Labrosse, 143.

— de M. Perrin, 143.

Azimut vrai du soleil, 112.

— — d'un objet, 112.

B

B, coefficient variable, 65; — Détermination avec C par deux observations de variation, 140; — avec B et D par trois observations de variation, 141; — (séparation des deux parties de), 69; — sans relèvement, 198; — compensation au départ, 198; — compensation à la mer, 198.

$\mathfrak{B}$, coefficient variable, 63, 157, 160; — détermination par la méthode graphique avec $\mathfrak{C}$, 169, 171; — avec $\mathfrak{C}$ et $\mathfrak{D}$, 248; différence avec $\mathfrak{C}$, 69.

b, paramètre dû au fer doux, 55-59 et pl. I, 56.

Balance d'inclinaison de Sir W. Thomson, 39.

Barre de Flinders, son but, 198; — sa mise en place, 211.

Bâtiment à la mer, 125.

— dans le port, 198.

— en rade, 109.

Bour (Edmond), cours de mécanique, 1.

C

C, coefficient variable, 65; — détermination avec B par deux observations

de variation, 141; avec B et D par trois observations de variation, 140; — sans relèvement, 248; — (séparation des deux parties de), 69; — compensation au départ, 198; — compensation à la mer, 232.
𝕮, coefficient variable, 63, 157, 160; — détermination par la méthode graphique avec 𝕭, 169-171; avec 𝕭 et 𝕯.
c, paramètre dû au fer doux, 55-57, et pl. I, 56; — sa détermination, 192.
Coefficients approchés, 65, 127, 162.
Calcul au moyen de 32 déviations, 129.
— — de 16 déviations, 133.
— — de 8 déviations, 135; comparaison des résultats, 136-139; — relations avec les coefficients exacts, 162-163.
Coefficients exacts, 152-163; — relation avec les paramètres dus au fer doux, 63; — relation avec les coefficients approchés; relation avec les forces directrices, 162-163.
Coefficients, leurs variations, 80.
Coefficient de la déviation due à la bande, 86.
Calcul (méthode pour le calcul des coefficients, 71.
Calculs (type de), pour les coefficients approchés, 133-135.
Calculs (type de), pour les déviations, 143.
Calculs (exemples de), pour les coefficients exacts.
Cartes d'égale force horizontale, pl. III.
Cartes d'égale inclinaison magnétique, pl. IV.
Cartes d'égale déclinaison magnétique, pl. V.
Convention pour compter les caps, 52.
Cap au compas et cap magnétique (Relation entre), 64.
Caspari (ingénieur hydrographe), ses travaux, 92, 259.
Centre de gravité, 7.
Choix d'un compas, 96.
Collignon (Mr), cours de mécanique, 1.
Compas à aiguilles multiples (ses avantages, 72, 97.
Compas de mât ou de hune, 88.
Compas de Sir W. Thomson, et appareils auxilliaires, 219-234.
Compas compensé de M. Peichl, 234.
Compas correcteur de M. J. Peichl, 261.
Compensation avantages, 202.
— nécessité, 193.
— principes de, 197.
— pratique de, 229.
— avee le compas de Sir W. Thomson, 239.
Compensation avec le compas de M. Peichl, 235.
Compensation sans relèvement avec le déflecteur, 241.
Compensation sans relèvement avec l'aiguille d'inclinaison de M. Peichl, 261.
Compensation, difficultés pratiques, 203.
Compositions des forces, 3.
Conclusion du livre, 26.
Conventions pour les notation des figures 19-20.
Conventions pour les pôles, 19.
Couple définition, 7; — moment d'un, 9.
Couple déviateur, 43; — directeur, 43; — terrestre, 24, 43.
Courbes des variations, 116 et pl. II.
— des déviations, 122 et pl. II.
Creak (E. W.) Staff-Commander, 27 et pl. V.

D

D Coefficient approché constant, 65; — sa détermination avec B et C; — sa relation avec les coefficients exacts. 162; — sa compensation, 199, 200.
𝕯 Coefficient exact constant, 63, 157; — sa valeur en fonction des paramètres dûs au fer doux, 63; — son rôle dans la construction du dygogramme, 166.
d, Paramètre dû au fer doux, 55 et pl. I, 56.
Déclinaison. — Définition, 25.
Détermination par les cartes de déclinaison, 144; — à la mer sans cartes de décl., 145; — relation avec variation et déviation, 105; — variations (de la), 26; — cartes d'égale, 27, et pl. V.
Décomposition des forces, 4.
Déflecteur de Sir W Thomson.
— son principe, 37.
— son emploi, 252.

Déflecteur, graduation de son échelle, 248.
— ses avantages, 260, 265.
Déplacement virtuel, 10.
Détermination à la mer des 3 coefficients B, C, D, 140, 248 ; — 2 coefficients, B, C, 141.
Détermination du rapport des forces horizontales magnétiques, 34 ; — des forces verticales magnétiques, 38.
Déviation. — Définition, 43. — Règle mnémonique pour trouver son signe, 105 ; — relation avec variation et déclinaison, 105 ; — formule générale pour sa tangente, 63 ; — sa formule exacte, 63 ; — sa formule approchée, 65.
Déviation constante (A) sa définition, 5.
Déviations (courbes et tables des), 122 et pl, II.
Déviation quadrantale (D et E), sa définition, 57 ; — constante pour une même cap, 66 ; — quadrantale positive, 67 ; — son maximum, 67 ; — sa valeur ordinaire, 68 ; — sa compensation, 68.
Déviation due à la bande, 81 ; — ses trois termes correctifs, 84 ; — son coefficient principal J, 86 ; — principe de sa compensation, 201 ; — pratique de sa compensation, 214.
Déviation semi-circulaire (B et C), 68 ; — sa définition, 47 ; — ses variations, 60, 61 ; — sa compensation, 198 ; — son maximum ; — sa valeur numérique, 68.
Déviation octantale, 73.
Déviation sextantale, 73.
Divergences entre théorie et pratique, causes et explication, 71, 80.
Duperrey (avantages des cartes de).
Dygogramme donnant la déviation et la force directrice de l'aiguille, 165, 174 : — ses avantages, 171 ; — son emploi à la mer, 173.

E

E Coefficient constant, 65 ; — sa faible valeur, 66 ; — sa détermination par le calcul, 133 ; — sa compensation, 199-200 ; — influence de cette compensation sur A, 201.
𝔈 Coefficient variable, 16, 157, 160 ; — sa valeur en fonction des paramètres du fer doux, 63.
e Paramètre dû au fer doux, 55 et pl. I, 56, 160.
Équateur magnétique, 29.
Équilibre d'un point matériel, 10.
— d'un système matériel, 11.
— (Équations générales d'), 9.
Erreur de parallaxe, 110.
Erreur due à la bande, 81, 146, 183.
— son importance, 148.
— (tables pour l'), 146.
— sa compensation, 214.
Erreur due au frottement, 98.
— — — dans le compas de Sir W. Thomson, 221.
Erreur dynamique due au roulis, 87.
— dite de Gaussin, 77.
— sur la détermination des coefficients, 36, 139, 240.
Exemples de calculs numériques pour les coefficients exacts, 174, 183.
Exemples de l'emploi de la méthode graphique, 174, 183.
Expression des forces magnétiques qui agissent à bord, 154.
Evans (Captain F. J.), ses travaux XXX, 94.

F

F Coefficient de l'erreur sextantale, 72.
f Paramètre dû au fer doux, 55 et pl. I, 56.
Faye (M. membre de l'Institut). Cours d'astronomie nautique, 54, 138, 240.
Fer doux (action de la terre sur le), 52.
Flinders (action sur la force directrice), 59.
Flinders, ses recherches, VII.
— sa barre, 198, 211.
Fluides magnétiques, 19.
Forces horizontales (cartes d'égales), pl. III et 41.
Forces (composition et décomposition des), 3, 5.
Force directrice de l'aiguille aimantée, 43.
Force directrice moyenne vers le Nord, 49, 59.
Force d'inertie, 14.
— constantes (mesure des), 29.
— inductrice, induite.

Forces magnétiques absolues, 40.
— magnétiques horizontales (rapport des), 34.
Forces magnétiques verticales (rapport des), 38.
Forces magnétiques à bord, 52 et 152.
— polaire du navire, 157.
Formule exacte de la déviation, 63.
— approchée, 64.
— fondamentale à cinq termes, 65.
Fournier (M. le capitaine de frégate), 37, 257.

G

G Coefficient de l'erreur sextantale, 72.
g Accélération due à la pesanteur, 2.
g Paramètre dû au fer doux, 55, pl. I, 56; — son importance, 192; — sa détermination graphique, 192.
Gaussin (ingénieur hydrographe en chef), erreur dite de, 77.
Gelgich (M. E.), directeur de l'École de navigation de Lussinpiccolo.
— sa table pour l'erreur de bande, 147.
— ses calculs pour le « Don Juan d'Autriche », 174.

H

H Coefficient de l'erreur octantale.
h Paramètre dû aux fer doux 55 pl. I, 56.
Halley (recherches sur le magnétisme terrestre) 28.
Hansteen (recherches sur le magnétisme terrestre), 28.
Hanusse (sous-ingénieur hydrographe), 259.

I

I 25.
Inclinaison (Variations de l'), 26.
— (Cartes d'égale 28), pl. IV.
— Propriétés de l'aiguille, 32.
— Aiguille de M. J. Peichl, 261.
Indépendance des aiguilles de Sir W. Thomson, 39.
Indépendance des effets des forces simultanées (principe des), 5.
Inertie (principe de l'), 5.
Influence sur le compas de la bande, 81-87.
— du cap de construction, 75.
— de l'imparfaite douceur du 75.
— de la longueur de l'aiguille aimantée, 72.
— de la route, 76.
— de la rotation du navire, 77.
Intensité des forces magnétiques, 29.
— (Mesure des), 34-40.
Installation des compas à bord, 101.
Instruments pour mesurer les forces magnétiques horizontales, 34-37-257.
Instruments pour mesurer les forces verticales, 38-40.
Instruments de Sir E. Sabime, 36.
— pour prendre les relèvements, 223.
— de M. le capitaine de frégate Fournier, 36.
— de M. Caspari, 257.
— de Sir W. Thomson, 37-39-220-223.

J

J Coefficient, 86; son importance, 148; Calcul de J en inclinant le navire, 146; calcul de J sans incliner le navire, 187; exemple de calcul de J, 191; sa compensation 214.
Jamin (M., membre de l'Institut), cours de physique, 18.

K

K Coefficient de l'erreur octantale.
k Paramètre dû au fer doux 55 et pl. I, 56.
Détermination de *k*.

L

L Ligne neutre, 18.
Lignes trigonométriques (propriétés des), 126-128.

Lignes trigonométriques naturelles, 272.
Lois des actions magnétiques, 21.
λ Coefficient constant 70-158 ; sa valeur, en fonction des paramètres du fer doux, 63 ; force directrice moyenne vers le Nord ; sa détermination, 154.

M

M Magnétisme terrestre, 24-42 ; sous-permanent, 45 ; induit, 45.
Masse 2.
Méridien magnétique, 25.
Mesure des forces constantes, 29.
— de la pesanteur, 30.
— des forces magnétiques, 31.
Méthodes des oscillations, 34.
— des écarts ou déflexion, 35.
— de la balance d'inclinaison, 39.
— des relèvements réciproques, 108.
Méthode pratique pour le calcul des 5 coefficients exacts, 163.
Méthode graphique pour avoir δ la déviation et la force directrice de l'aiguille à bord, 165-173.
Moment d'une force, 9
— d'un couple, 9.
— d'inertie d'un corps, 17.
Moutier (M.), théorie élémentaire du miroir azimutal Note V.
Mouvement d'un point, 5.
— d'un système matériel, 5.
— d'un solide libre, 13.
— autour d'un axe, 13.
— de la rose d'un compas, 89. 95.
μ, détermination de 189-191.

N

Napier (M. J.), son diagramme pour les courbes de variation et déviation, 121.
Neumayer (Appareil du Dr), 161.

P

P, composante horizontale de magnétisme sous-permanent 62 et 153.
Paramètres dus au fer doux, 54-56.
Paramètres, leurs variations, 80.
Parallélogramme des forces, 3.
Paugger (appareil du Dr), 144.
Peichl (M. le lieutenant de vaisseau J.), ses instruments, 235-261.
Perrin (M. le lieutenant de vaisseau E), tables d'azimut, 115.
Piaud (S. ingénieur de la marine) sur le miroir azimutal, 328.
Pôles 18 (définition précise des), 20.
— Magnétiques terrestres, 27.
Poisson (cours de Mécanique) 30-91.
Problèmes de route. 106.
Solution par diagrammes, 121.

Q

Q, Composante horizontale du magnétisme sous-permanent, 52 et 152.

R

R, composante verticale du magnétisme sous-permanent, 52 et 152.
Régulation des compas.
Régulation avec relèvements, 125-135.
Régulation sans relèvements terrestres ni célestes, 246.
Relations des lignes trigonométriques de certains arcs, 127.
Remarques pratiques sur la déclinaison, 28.
Représentation du fer doux de navire, au moyen de neuf tiges de fer doux, 54, et planche I, 56.
Résal (M. membre de l'Institut), Cours de Mécanique, 1.
Résumé de la 1re partie, 99.
— 2e partie, 148.
— 3e partie, 193.
— 4e partie, 239.
Rose de Sir W. Thomson, 220.
Route. Influence sur les déviations, 76. (table de), 119.

S

Sabine (général Sir E.) ses travaux. XXIV.

Sabine. Détermination de déviation demi-circulaire, 36.
Scoresby (docteur). Ses travaux.

T

Table d'azimut, 113.
Tables des coefficients pour différents types de navires, 161.
— des déviations, 123.
— des variations, 117.
— de route, 119.
Table des produits des arcs pour les sinus des quarts, 267.
Table de conversion des quarts en degrés,
Table des lignes trigonométriques naturelles, 272.
Termes correctifs de l'erreur due à la bande 181.
Thomson (Sir William). Déflecteur, 37.
— Aiguille d'inclinaison, 39-222.
— Compas-Rose, 220.
— Miroir azimutal, 223-226.
Travail d'une force, 10.
— virtuel, 10.
Types de calcul, 133-135-143-174.

V

Vitesse angulaire, 12.
Variation du compas, définition, convention, 104.
— règle mnémomique pour trouver son signe, 105.
— courbes, 116 et pl. II.
— tables de, 117, 119.
Variations générales des paramètres et coefficients de la déviation, 80.
Variations dues à la bande, 83, 85.

X

X Une des composantes horizontales magnétiques de la terre, 152.
X' Une des composantes horizontales de la force magnétique à bord, 153.

Y

Y Une des composantes horizontales magnétiques de la terre, 152.
Y' Une des composantes horizontales de la force magnétique à bord, 153.

Z

Z Composante verticale magnétique terrestre, 152.
Z' Composante verticale de la force magnétique à bord, 153.

Voyez les additions de la seconde édition dans la table analytique.

FIN DE LA TABLE ALPHABÉTIQUE DES MATIÈRES

TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES

Préface. I
Avertissement au lecteur. X
Sommaire du livre. XIV
Feuille signalétique proposée pour les compas. XV

INTRODUCTION PRÉLIMINAIRE

PREMIÈRE SECTION

Rappel des notions élémentaires de mécanique

Chapitre premier. — Mouvement d'un point matériel. 1
Force. 1
Accélération. 2
Masse. 2
Équilibre 2
Composition des forces. 3
Décomposition des forces 4
Chapitre II. — Mouvement d'un système matériel 5
Notion du couple 7
Notion du centre de gravité 7
Moment d'une force, d'un couple 8
Chapitre III. — Équations générales de l'équilibre 9
Travail d'une force 10
Déplacement virtuel. Travail virtuel. 10
Équilibre d'un point matériel. 10
Équilibre d'un système matériel 11
Équations générales de l'équilibre d'un système quelconque 12
Mouvement d'un solide libre 13

Pages.
Force d'inertie 14
Chapitre IV. — Mouvement autour d'un axe 15
Vitesse angulaire, accélération angulaire 15
Moment d'inertie. 17

DEUXIÈME SECTION

Rappel des notions de physique

Chapitre premier. — Définitions. Notations. Conventions. 18
Aimants naturels et artificiels. 18
Fluide magnétique. 18
Pôles. Ligne neutre 18
Dénomination des pôles. Conventions. 19
Conventions pour les lettres employées dans les figures. 19
Définition précise des pôles. 20
Chapitre II. — Lois des actions magnétiques. Magnétisme induit 21
Action directrice de la terre sur les aimants 22
Action des aimants sur le fer doux. Force inductrice. Magnétisme induit 23
Action des aimants sur l'acier. Force coercitive 23
Action de la chaleur sur les aimants 24
Aimantation par l'action de la terre. 24
Chapitre III. — Du magnétisme terrestre 24
Couple terrestre. 24
Méridien magnétique. Déclinaison 25
Inclinaison 25
Variations de la déclinaison et de l'inclinaison 26
Lignes d'égale déclinaison. Cartes 26
Pôles magnétiques terrestres. 27
Recommandation pratique 28
Courbes d'égale inclinaison. 28
Équateur magnétique. 29
Chapitre IV. — Intensité des forces magnétiques. 29
Mesure des forces constantes 29
1re méthode, dite des oscillations. 30
Application à la pesanteur. 30
Application aux forces magnétiques. 31
Propriétés importantes de l'aiguille d'inclinaison 33
Principe du Control Compas de M. Peichl. 34
Détermination du rapport des composantes horizontales magnétiques dans deux lieux différents 34
Instrument et méthode d'observation 35
2me méthode, dite des écarts ou des déflexions 35
Appareil de Sir E. Sabine. 35
Appareil du commandant Fournier. 37
Déflecteur de Sir William Thomson. 37
Détermination du rapport des forces magnétiques verticales 38
1re méthode, dite des oscillations. Instrument nécessaire pour l'appliquer. 38
2me méthode, dite de la balance d'inclinaison 39
Description de la balance d'inclinaison de Sir W. Thomson 39
Forces magnétiques absolues. 40
Cartes d'égales forces horizontales 41
Variations continuelles du magnétisme terrestre. 42

PREMIÈRE PARTIE

DÉVIATION DES COMPAS

Pages.

CHAPITRE PREMIER. — Action des aimants sur l'aiguille du compas. Déviation semi-circulaire 43
Couple déviateur. Force directrice de l'aiguille aimantée. Déviation. 43
Magnétisme sous-permanent. Magnétisme induit. . . 45
Action sur l'aiguille aimantée d'un aimant placé au-dessus ou au-dessous de la rose. . . . 45
Déviation semi-circulaire. Formule de sa tangente. . . 47
Force directrice moyenne vers le Nord. Influence des aimants sur cette force. 49
Action d'un aimant placé sur le même plan horizontal que la rose. 50
Action d'un aimant placé perpendiculairement au plan de la rose 51
Applications au navire 51
CHAPITRE II. — Action des pièces de fer doux sur le compas. Déviation semi-circulaire. Déviation quadrantale 52
Action de la terre sur le fer doux. . . 52
Axes choisis pour la décomposition des forces magnétiques à bord 53
Convention pour le cap 53
Représentation du fer doux du navire au moyen de neuf tiges idéales. 54
Déviation quadrantale. . . 57
Effet du fer doux sur la force directrice moyenne. . 59
Explication de la différence des actions des aimants et du fer doux sur la force directrice moyenne. . . 59
Déviation semi-circulaire produite par le fer doux vertical. 60
Influence du cap et de la position géographique du navire. 60
Changement de la déviation semi-circulaire totale 61
Appareil de Neumayer. . 61
CHAPITRE III. — Formules de la déviation. 61
Relation entre le cap du bâtiment et la déviation produite par le fer doux. 61
Expression de la tangente de la déviation 63
Coefficients exacts 63
Coefficients approchés. . 64
Formule simplifiée de la déviation. 65
Déviation constante. — Coefficient constant A. . . 6
Déviation quadrantale. — Sa constance pour un cap donné. Coefficient constant D et E. . 67
Maximum de la déviation quadrantale. 67
Déviation quadrantale positive. — Coefficient constant D. 67
Sa valeur numérique. . 67
Déviation semi-circulaire. — Son maximum. 68
Des coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. 68
Différence entre $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. . 69
Séparation des deux parties de ces deux coefficients 69
Du coefficient constant λ. 70
Méthode pour calculer les coefficients. 71
CHAPITRE IV. — Causes des divergences observées entre la théorie et la pratique 71
Influence de la longueur de l'aiguille aimantée. — Déviations sextantale et octantale. . 72
Imparfaite douceur du fer : 1° Influence du cap de construction. . 75

Pages.
2° Influence de la route. — Conséquences pratiques 76
3° Erreur dite de Gaussin. 77
Remarques générales sur les variations des paramètres et des coefficients. 80
CHAPITRE V. — Influence de la bande sur la déviation. 81
Considérations générales 81
Valeur que prennent les différents paramètres des coefficients quand le navire donne de la bande. 83
Définition précise de la déviation due à la bande. 83
Simplification due à la symétrie ordinaire du fer doux. 86
— — à la petitesse de l'angle i. 86
Influence du roulis sur la déviation. 87
Erreur dynamique due au roulis. 87
CHAPITRE VI. — Conclusion. Applications des notions précédentes au mouvement de la rose d'un compas. 88
1er CAS. — Mouvement d'une rose de compas autour de son pivot vertical, à terre, quand elle est écartée de la position d'équilibre et soumise à la seule force magnétique terrestre. 88
Moment magnétique d'une aiguille v. Note I 89
2° CAS. — Mouvement de la rose à bord d'un navire où la déviation est nulle, c'est-à-dire sous l'influence de la force magnétique terrestre et des mouvements communiqués au navire par la mer. 90
Compas à aiguilles multiples. 91
Poids et moment d'inertie du compas. 92
Période d'oscillation du compas. 94
Orientation d'un compas à bord. 95
Utilité de la cuve en cuivre. 96
Choix d'un compas.. 97
Choix et examen du pivot et de la chape 97
Diamètre du compas. 98
De l'erreur due au frottement.. 98
Régulation et compensation des compas,. 98
Résumé de la première partie. 92

DEUXIÈME PARTIE

RÉGULATION DES COMPAS

Calcul des coefficients approchés au moyen d'observations de déviation seulement

CHAPITRE PREMIER. — Installation du compas à bord v. Note II. . 101 104
CHAPITRE. II. — Variation. — Déclinaison. — Déviation. — Conventions 104
Règle mnémonique pour trouver immédiatement le signe de la variation et de la déviation. 105
Relation entre la variation, la déclinaison et la déviation. 105
Relation entre la route vraie, la route au compas et la variation. 106
Passer d'une route vraie à la route au compas correspondante. Exemples. 106
Passer d'une route au compas à la route vraie correspondante. Exemples. 107
Désavantages des conventions employées habituellement pour compter les angles de route et les azimuts. 107
Précautions à prendre avant de déterminer la variation. 108
CHAPITRE III. — Méthodes pour obtenir la variation du compas. 108
Bâtiment dans le port. — Méthodes des relèvements réciproques. 108

Pages.
Bâtiment en rade. 109
Erreur de parallaxe. 110
Calcul de l'azimut vrai du soleil. — Calcul de l'azimut vrai d'un objet. 111
Calcul de l'azimut vrai d'un astre autre que le soleil. — Emploi des tables d'azimut. 112
Tables de M. Labrosse 113
Angle au pôle et sa recherche. 114
Tables de M. Perrin. — Pratique de l'observation. 115
CHAPITRE IV. — Courbes et tables de variation et de déviation. 116
Table I_v pour enregistrer les variations observées. — Courbe des variations. 117
Table II_v dite table de route. 119
Diagramme de Napier. 121
Règle I. — Pour passer d'une route au compas à la route vraie correspondante. 121
Règle II. — Pour passer d'une route vraie à la route au compas correspondante. 121
Recommandations pratiques 122
Courbes et tables de déviation. 123
Remarques pratiques 124
Bâtiment à la mer. — Précautions à prendre pour avoir un bon relèvement. 125
CHAPITRE. V 126
Calcul des cinq coefficients approchés. 126
Relations des lignes trigonométriques 127
1er CAS. — Calcul des coefficients approchés A, B, C, D, E au moyen de 32 déviations 129
Types pour ce calcul 132 133
2e CAS. — Calcul des mêmes coefficients au moyen de 16 déviations. 134
3e CAS. — Calcul des mêmes coefficients au moyen de 8 déviations 133
Types pour ces calculs. 135
Calcul de quatre coefficients au moyen de 4 déviations principales. 135
Calcul recommandé pour la pratique. 137
Exactitude de la méthode 138
CHAPITRE VI. — Simplification du problème, trois coefficients sont constants et deux seulement variables 139
Détermination à la mer des trois coefficients B, C, D par trois observations faites dans un même quadrant 141
Détermination à la mer des deux coefficients B et C 141
Calcul des déviations au moyen des cinq coefficients A, B, C, D, E. 142
Type pour ce calcul 142
Remarque importante. 144
Appareil du docteur Paugger. 144
Déterminer la déclinaison à bord, soit en rade, soit à la mer 144
CHAPITRE VII. — Détermination pratique, en faisant incliner le navire du coefficient dû à la bande. 146
Influence de la déviation due à la bande 146
Détermination de J en faisant incliner le navire. 146
Table pour enregistrer l'erreur due à la bande 147
Importance du coefficient de bande. 148
Résumé de la seconde partie 149

TROISIÈME PARTIE

EXPRESSIONS DES FORCES MAGNÉTIQUES QUI AGISSENT A BORD

Des Coefficients exacts

Pages.

CHAPITRE PREMIER.
Diverses expressions des forces magnétiques 151
CHAPITRE II.
Calcul de λ et des cinq coefficients exacts au moyen d'observations de rapports de forces magnétiques . 154
Calcul du coefficient constant λ 155
1° Sans connaître les coefficients exacts et par la méthode des oscillations. 155
2° Au moyen d'une seule observation, quand on connaît les coefficients exacts . 155
3° Au moyen du déflecteur. 156
4° Pour un compas compensé . . . 156
Calcul des coefficients constants $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$ 156
Calcul des coefficients variables $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. 157
Force polaire du navire. 157
Angle tribord. 158
CHAPITRE III.
Influence de l'arrangement du fer doux à bord sur les coefficients 158
Du coefficient constant λ. 159
Du coefficient $\mathfrak{D}$. 160
Des coefficients constants $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. 160
Constance de λ, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ 160
Des coefficients variables $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$. 160
Table des valeurs des coefficients et paramètres $\mathfrak{D}$, λ a, e et g pour différents types de navires. . . 161
CHAPITRE IV. — Méthode pratique pour le calcul des cinq coefficients exacts. 162
Relations entre les coefficients exacts et les coefficients approchés. 162
Coefficients approchés en fonction des coefficients exacts 162
Coefficients exacts en fonction des coefficients approchés 163
Remarque importante. . . 164
CHAPITRE V. — Méthode graphique pour obtenir la déviation et la force directrice correspondantes à un cap magnétique donné. 165
Construction du dygogramme . . 167
1er CAS. — Obtenir la force et la déviation correspondantes à un cap vrai ou magnétique donné quand la courbe ost tracée. 167
2e CAS. — Obtenir à un cap quelconque la force directrice en parties de λ H et la déviation quand on connaît les cinq coefficients exacts 169
Trouver les coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ quand on a $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$ avec le rapport $\frac{H'}{\lambda H}$ et δ à un cap donné. 169
3e CAS. — Sans connaître λ, obtenir la force directrice en parties de λ H et la déviation à un cap quelconque, ou, ce qui revient au même, les deux coefficients $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$, quand on connait $\mathfrak{A}$, $\mathfrak{D}$, $\mathfrak{E}$ et deux déviations à des caps donnés. . 170
Détermination de $\mathfrak{B}$ et $\mathfrak{C}$ avec les mêmes données. . 171

Pages.
Simplification du dygogramme quand $\mathfrak{A}$ et $\mathfrak{E}$ sont négligeables 171
Avantages du dygogramme 171
Conclusion . 173
CHAPITRE VI.
Exemples de calculs numériques et d'emploi de la méthode graphique. 174
Exemple numérique pour la détermination de B et C par une seule observation de déviation et une seule observation d'intensité de force quand on connaît λ. 179
Emploi de la méthode graphique. 180
Application de ce problème à la mer. 180
Détermination par la méthode graphique B et C au moyen de deux observations de déviation sans connaître λ 182
CHAPITRE VII. — Déviation due à la bande. 183
Coefficient de l'erreur due à la bande 184
Examen des trois termes correctifs introduits par la bande . 184
Des signes de J et de l'erreur due à la bande. Autre forme du coefficient J. 186
Calcul de J sans mettre le navire à la bande 187
Détermination de μ. 187
Détermination de $\frac{Z'}{Z}$ 188
Méthode graphique pour déterminer μ et g. 189
Son utilité . . . 189
Application de la méthode graphique. 190
Exemple du calcul de J 191
Utilité de la détermination de g 192
Détermination simultanée de g et c. 192
Détermination de c . 192
Résumé de la troisième partie. 193

QUATRIÈME PARTIE

COMPENSATION DES COMPAS

CHAPITRE PREMIER. — Nécessité de la compensation 194
CHAPITRE II. — Principes de la méthode de la compensation. 197
Correction du terme en A. 197
Correction du terme en B. Barre de Flinders 198
Correction du terme en C, en D et en E v. Note III. 198-201
Influence de la correction de E sur la valeur de A. 201
Principe de la correction de l'erreur due à la bande 201
Avantages de la compensation. 202
Difficultés pratiques de la compensation. . 203
CHAPITRE III. — Détails des opérations pratiques à faire pour compenser les compas. 205
1er CAS. — On connaît les cinq coefficients. A et E sont négligeables. 205
2me CAS. — On ne connaît pas les cinq coefficients et on peut faire un tour d'horizon. Remarques pratiques. 207
3me CAS. — On veut compenser les compas en profitant des évitages du bâtiment. 209
Remarques pratiques. 211

Pages.

CHAPITRE IV. — Compas de sir William Thomson. 212
Rose. 213
Habitacle. 214
Appareils auxiliaires. Aiguille d'inclinaison. Déflecteur.. 214
Miroir azimutal (V. Note V). 215
Erreurs commises dans les relèvements. 217
Recommandations pratiques.. 220
CHAPITRE V. — Pratique de la compensation.. 221
Mise en place. Orientation des aimants. 225
Compensation partielle. 225
Mise en place des sphères. . . 227
Rectification de la position des compensateurs. 228
Cas exceptionnel de la compensation. 232
Correction de E. 233
Compensation pour la bande 233 *b*
Tableaux numériques pour la mise en place des sphères 233 *e*
CONCLUSION. — Avantages de la compensation approximative.. 233 *i*
Rectification de la compensation à la mer.. 233 *i*
Compas compensé de M. J. Peichl.. 235
De l'ancien matériel de compas. 239
Résumé de la quatrième partie. 239
Règles pratiques pour la compensation approximative. 240

CINQUIÈME PARTIE

RÉGULATION ET COMPENSATION DES COMPAS SANS RELÈVEMENTS

CHAPITRE PREMIER. — Principe de la compensation par le déflecteur. 241
Tâtonnements dans la pratique. 243
Modification de la force directrice. . 244
CHAPITRE II. — Graduation de l'échelle du déflecteur et emploi de cet instrument.. 247
Examen préalable du déflecteur. . 252
CHAPITRE III. — Pratique de la compensation sans relèvements. 254
Valeur des coefficients en fonction des forces directrices.. 256 *a*
CHAPITRE IV. — Contrôle de la compensation à la mer. 256 *c*
CHAPITRE V. — Régulation du compas avec le déflecteur. 256 *e*
Mesure des forces horizontales. 257
Avantages du déflecteur 260
CHAPITRE VI. — Compas correcteur de M. J. Peichl. 261
CONCLUSION.. 266
TABLE des produits des arcs par les sinus des rumbs. 267
TABLE des lignes trigonométriques naturelles.. 272
TABLE pour convertir les rumbs principaux du compas et leurs fractions en degrés et minutes. 273

APPENDICE

Pages.

NOTE I. — Renvoi de la page 89. — Détermination du moment magnétique et du moment d'inertie d'une rose de compas. 275
NOTE II. — Renvoi de la page 103. — Sur l'angle de 54° 55' 276
NOTE III. — Renvoi de la page 200. — Sur les sphères compensatrices. 277
NOTE IV. — Renvoi de la page 217. — Sur la fraction de l'erreur due à la bande corrigée par la compensation préalable d'un degré de la déviation quadrantale. 279
NOTE V. — Renvoi de la page 228. 279
Table alphabétique des matières.. 281

ADDITIONS

PRÉFACE. — AVERTISSEMENT. — SOMMAIRE DU LIVRE I à X

PREMIÈRE PARTIE

Du bon fonctionnement des compas à bord. De la paresse des compas.. 100
De la nécessité des observations de force directrice . à
De la durée d'oscillation de la rose. .
Des coefficients. Des déviations anormales 100 *m*

DEUXIÈME PARTIE

INTRODUCTION. Conditions d'exactitude de la régulation et de la compensation. . . 100 *m* à 101
Importance des coefficients. 149

TROISIÈME PARTIE

Étude complète des coefficients B et C. . . 193
Déviations anormales dues à la route actuelle ou à la route immédiatement antérieure. . . 193
Des coefficients A, B, C, D, E, λ. . . à
Des coefficients J et μ. Séparation de μ en deux parties.
Résumé des observations nécessaires 193 *t*
Importance du dygogramme . 194

QUATRIÈME PARTIE

Remaniement du Chapitre V. 221

CINQUIÈME PARTIE

Remaniement des chapitres II, III, IV.. . 247-257
NOTE VI. — (V. p. 61.) Appareils de démonstration du docteur Neumayer et du commodore Walker. 281

Pages.

NOTE VII. — (V. p. 61-75-193.) Influence du cap de construction et de la route. 282
NOTE VIII. — (V. p. 45.) Action des aimants sur l'aiguille aimantée. . 283
NOTE IX. — (V. p. 89.) Moments magnétiques absolu et directeur des aiguilles et des barreaux aimantés. . 285
PLANCHE I. — Représentation du magnétisme du navire par trois aimants et neuf tiges de fer doux. . 56
PLANCHE II. — Courbes des variations et déviations. . 287
PLANCHE III. — Courbes d'égale force horizontale. . 289
PLANCHE IV. — Courbes d'égale inclinaison magnétique. 291
PLANCHE V. — Courbes d'égale déclinaison magnétique. . . . 293
PLANCHE VI (addition). — Abaque hexagonal dressé par M. Renard, chef du bureau du nivellement géodésique pour appliquer aux déviations la méthode de calcul graphique de M. Lallemand, ingénieur des Mines. 295

FIN DE LA TABLE ANALYTIQUE DES MATIÈRES.

Paris. — Typ. G. Chamerot, 19, rue des Saints-Pères. — 19545.