

**NOTIONS SOMMAIRES SUR LA DÉVIATION DES BOUSSOLES
PAR LE FER DES NAVIRES;**

PAR M. E. CASPARI,
Ingénieur hydrographe de la Marine.

On nomme *régulation des compas* l'ensemble des procédés employés pour déterminer et corriger l'influence perturbatrice qu'exerce, sur les boussoles ou compas, le fer qui entre dans la construction et dans le chargement des navires.

L'action de l'aimant terrestre sur une aiguille librement suspendue est telle, que celle-ci prend en chaque lieu une direction fixe : on peut négliger ici les actions à courte ou longue période qui font varier en un même lieu l'intensité et la direction de cette force.

Admettons que, par un procédé quelconque, on ait forcé l'aiguille à se mouvoir horizontalement, l'action perturbatrice du fer du navire se traduit alors :

1° Par une *déviaton* de l'aiguille, en dehors du méridien magnétique ;

2° Par une altération en grandeur de la force directrice agissante. Ces effets, comme on l'aperçoit facilement *a priori*, varient dans le cours de l'évolution du navire et dépendent de son orientation.

Pour diriger sa route d'après le compas, il faut donc, ou annuler les déviations, ou pouvoir les connaître à chaque instant pour en tenir compte, comme d'une variation.

Quelques définitions préliminaires de termes marins seront utiles.

Variation. Synonyme de déclinaison de l'aiguille aimantée.

Cap ou route. Azimut de l'avant du navire vu de l'arrière.

Rhumb ou aire de vent. Divisions de la rose des vents que porte la boussole.

Déviaton. Différence entre le cap d'après le compas influencé et le cap magnétique réel.

Tribord. Direction à droite d'un observateur regardant de l'arrière à l'avant.

On est convenu de donner le signe + aux déviations et forces vers la droite (est et tribord).

1. *Explication élémentaire des déviations.*— Le fer des navires agit de deux manières sur les compas.

Certaines pièces de fer dur qui sont restées longtemps à la même position pendant la construction du navire, et qui ont subi dans cette position des actions mécaniques, telles que torsions, martelages, etc., acquièrent sous l'influence de la terre un magnétisme persistant ou permanent. C'est ce qui arrive notamment aux navires construits entièrement en fer. Ces navires peuvent être généralement considérés comme des aimants, et la position des pôles dépend de l'orientation du bâtiment pendant la construction.

On a constaté, dans certains cas, qu'en plaçant une boussole en dehors et près du navire, un des pôles de cette boussole est attiré par le navire orienté à un certain cap, et repoussé quand on a fait tourner le navire de 180 degrés. Quelquefois, comme cela est arrivé au *Narval*, cette polarité est assez développée pour déterminer l'orientation du navire en eau calme.

Pour un compas placé à bord on peut assimiler cette action à celle d'un aimant permanent, qui agirait sur la boussole comme une force de direction et d'intensité constantes (ou plutôt comme un couple; mais il n'est nécessaire de considérer que l'une des forces de ce couple).

Lorsque l'orientation du navire est telle qu'un des pôles de cet aimant résultant agisse dans la même direction et le même sens que le pôle terrestre de même nom, l'aiguille n'est pas déviée, mais la force directrice qui agit sur elle est augmentée pour ce cap; elle est diminuée pour le cap diamétralement opposé, et n'y produit encore pas de déviation.

Le navire évoluant, l'azimut du pôle considéré par rapport au méridien magnétique change, et les deux forces de la terre et du navire se composent suivant une résultante intermédiaire qui fait sortir l'aiguille du méridien magnétique. Cette action est maximum quand le navire est à 90 ou 270 degrés du rhumb de déviation nulle; si d'ailleurs elle est positive pour le premier de ces caps, elle sera négative pour le second; autrement dit, elle change de signe en passant par zéro; c'est ce que l'on exprime en lui donnant le nom de *déviatiou semi-circulaire*.

Le fer doux contenu dans le navire agit sur le compas par le magnétisme passager qu'y développe l'induction de l'aimant terrestre

d'une part, et du fer magnétique du navire d'autre part. Le résultat de cette dernière induction se confond avec l'effet dû au magnétisme permanent dont elle dépend. Quant à l'induction terrestre, elle peut se décomposer en une action verticale et une action horizontale. L'induction verticale est la même à tous les caps du navire; elle produit donc encore une déviation semi-circulaire, qui se distingue de celle due au magnétisme permanent en ce que cette dernière est constante en force aussi bien qu'en direction, tandis que l'induction verticale varie avec la latitude magnétique, s'annule sous l'équateur et change de signe dans l'hémisphère sud.

Quant à la valeur de la *dévi*ation semi-circulaire, elle varie pour les deux cas, quand le navire se déplace; car pour celle due au fer dur, la force restant constante, sa résultante avec la force horizontale terrestre varie quand cette dernière varie. Pour celle due au fer doux vertical, nous venons de voir qu'elle change même de signe d'un hémisphère à l'autre.

Reste à considérer l'induction *horizontale* du fer doux.

Considérons un barreau transversal de fer doux.

Quand le cap est au nord, ce barreau orienté est-ouest n'est pas magnétique, déviation *nulle*. De même avec le cap au sud.

Avec le cap à l'est, le barreau est aimanté; mais alors il se trouve parallèle au compas, et ne peut agir pour le dévier; il modifie seulement la force directrice. De même pour le cap à l'ouest.

Si, au contraire, le cap est au N.-E., l'extrémité de tribord attirera le pôle nord de l'aiguille et donnera une déviation positive, si le barreau est devant le compas ou à tribord; cette déviation deviendra négative avec le cap au S.-E.

Un raisonnement analogue rendra compte des effets d'une barre longitudinale de fer doux, ainsi que des effets variables résultant des dispositions spéciales de ces barreaux sur les côtés ou à l'avant et à l'arrière du compas. On trouvera ainsi, en résumé, que le magnétisme induit horizontal produit une déviation *quadrantale*, c'est-à-dire maximum aux caps inter-cardinaux, N.-E., S.-E., S.-O. et N.-O., s'annulant et changeant de signe aux quatre caps cardinaux.

Enfin les variations de force directrice qui résultent de cette action du magnétisme induit peuvent réagir indirectement sur la valeur de la déviation semi-circulaire.

On a admis, dans la théorie de la régulation des compas, que les dimensions de la boussole sont négligeables relativement à la distance aux masses de fer les plus voisines. Cette hypothèse est permise, comme l'expérience le prouve, eu égard au degré de précision que comportent les observations à la mer, à deux conditions toutefois :

1° Éviter l'usage des aiguilles trop longues ; les compas de relèvement de notre marine ont des aiguilles dont la distance intermédiaire ne dépasse guère $0^m,18$;

2° Surtout donner au compas *étalon* une position dans la partie du navire la plus libre de fer que l'on pourra trouver, à 2 mètres *au moins* de toute pièce de fer de quelque importance.

Ce premier aperçu nous permet de prévoir que la déviation *totale* se compose de la superposition ou addition des déviations semi-circulaire et quadrantale.

2. *Détermination expérimentale des déviations.* — On fait tourner le navire et on l'arrête à chacune des positions pour lesquelles on veut avoir la déviation ; on mesure directement celle-ci en déterminant séparément le cap au compas et le cap magnétique réel ; on peut alors la réduire en tables. On la détermine ordinairement pour 16 ou 32 rhumbs équidistants, on l'étend aux rhumbs intermédiaires par une interpolation graphique (diagramme de Napier). On peut à volonté prendre pour argument le cap au compas, ou le cap magnétique réel. Il est évident que chaque compas placé dans une position différente exige une table spéciale. Ces expériences, fort simples d'ailleurs, n'ont d'intérêt que pour la pratique des marins, et nous n'insisterons pas sur les détails des opérations.

Le navire muni de ces données peut naviguer en toute sûreté en tenant compte des erreurs dont les indications du compas sont entachées.

Néanmoins, la table des déviations ne peut servir que lorsqu'on ne change pas sensiblement de latitude magnétique ; car l'induction et la force directrice du globe variant font aussi varier les deux parties de la déviation.

Enfin il y a une dernière restriction très-importante.

Le magnétisme du fer dur, considéré d'abord comme permanent

par M. Airy, s'est montré sujet à varier, comme il résulte des observations du D^r Scoresby. Il diminue assez rapidement pendant les premiers mois qui suivent le lancement ; il peut même arriver que des influences électriques ou les chocs répétés des lames contre la carène par gros temps modifient plus ou moins ce magnétisme : cela tient, en partie, à ce que la force coercitive du fer dur est moindre que celle de l'acier ; aussi a-t-on appliqué plus justement à ce magnétisme le nom de *sous-permanent* (1).

Il résulte de là qu'il y aurait imprudence à se servir d'un compas dont les erreurs seraient trop fortes, en raison de la nature variable de ces erreurs, puisqu'elles varient d'une part avec le temps et d'autre part avec la latitude magnétique. D'ailleurs les grandes déviations indiquent aussi des variations considérables de la force directrice de l'aiguille, suivant les orientations du navire ; à certains caps la diminution de force directrice peut rendre l'aiguille paresseuse.

Ces diverses considérations ont conduit à chercher les moyens de simplifier les méthodes pour obtenir la déviation en cours de navigation, en réduisant et rendant plus faciles les observations, ainsi que de diminuer la valeur absolue des déviations et des variations de la force directrice. On a eu recours à la théorie pour cet objet, et l'on a réussi ainsi, non-seulement à réduire le nombre des observations nécessaires à la construction des tables, mais encore à prévoir l'influence des changements de latitude, et, enfin, à diminuer la grandeur des actions perturbatrices.

3. *Théorie mathématique des déviations.* — Poisson, le premier, partant des principes de la théorie du magnétisme induit, établis par lui (voir *Mémoires de l'Académie des Sciences*, t. VI, VII et XVI et les *Additions à la Connaissance des Temps*, 1841), a montré que les composantes de la force exercée par le fer induit du navire, suivant trois axes coordonnés rectangulaires, situés dans le navire, sont des fonctions linéaires de l'action de la terre, projetée sur les mêmes axes.

(1) Pour le magnétisme passager, M. Gaussin a établi que, le fer n'étant pas parfaitement doux, l'action inductrice de la terre ne se produit pas instantanément dans le cours d'une évolution du navire.

En prenant pour origine le centre du compas, pour axe des X une horizontale dirigée vers l'avant, pour axe des Y une horizontale dirigée vers tribord, et pour axe des Z une verticale dirigée vers le nadir, et désignant par

X, Y, Z les composantes de l'action terrestre,

X', Y', Z' celles de la force totale agissant sur le compas (terre et navire),

P, Q, R celles du magnétisme sous-permanent,

on a les équations suivantes :

$$(1) \quad X' = X + aX + bY + cZ + P,$$

$$(2) \quad Y' = Y + dX + eY + fZ + Q,$$

$$(3) \quad Z' = Z + gX + hY + kZ + R,$$

dont les paramètres a, b, \dots, k ne dépendent que de la quantité et de la disposition du fer doux qui existe à bord.

Ces formules ne sont fondées que sur les hypothèses généralement admises dans la théorie du magnétisme. Elles sont susceptibles d'une interprétation physique. Les neuf termes aX, bY, \dots peuvent être représentés par autant de barreaux de fer doux, respectivement parallèles aux axes coordonnés correspondants, et ayant des dispositions variables suivant la distribution du fer à bord.

Pour rendre ces formules plus faciles à appliquer dans la pratique, M. Archibald Smith les a transformées, en y introduisant la force horizontale terrestre H , celle du navire et de la terre H' , l'inclinaison θ , enfin les routes magnétiques réelle ζ et apparente ζ' du navire, et la différence qui est la déviation $\delta = \zeta - \zeta'$.

Les équations (1) et (2) transformées ainsi ont donné la force vers l'est magnétique :

$$(4) \quad \left\{ \begin{array}{l} \frac{H'}{H} \sin \delta = \frac{d-b}{2} + \left(c \operatorname{tang} \theta + \frac{P}{H} \right) \sin \zeta \\ \quad \quad \quad + \left(f \operatorname{tang} \theta + \frac{Q}{H} \right) \cos \zeta \\ \quad \quad \quad + \frac{a-e}{2} \sin 2\zeta + \frac{d+b}{2} \cos 2\zeta, \end{array} \right.$$

et la force vers le nord :

$$(5) \quad \left\{ \begin{aligned} \frac{H'}{H} \cos \delta &= 1 + \frac{a+e}{2} + \left(c \operatorname{tang} \theta + \frac{P}{H} \right) \cos \zeta \\ &+ \left(f \operatorname{tang} \theta + \frac{Q}{H} \right) \sin \zeta \\ &+ \frac{a-e}{2} \cos 2\zeta - \frac{d+b}{2} \sin 2\zeta. \end{aligned} \right.$$

Si l'on prend H pour unité, ces formules montrent que la force moyenne vers l'est est $\frac{d-b}{2}$, et la force moyenne vers le nord $1 + \frac{a+e}{2}$. On désigne habituellement cette dernière quantité par λ . Elle joue un rôle important dans les formules.

Ces équations, par des transformations faciles, conduisent aux équations suivantes :

$$(6) \quad \operatorname{tang} \delta = \frac{\mathfrak{A} + \mathfrak{B} \sin \zeta + \mathfrak{C} \cos \zeta + \mathfrak{D} \sin 2\zeta + \mathfrak{E} \cos 2\zeta}{1 + \mathfrak{B} \cos \zeta - \mathfrak{C} \sin \zeta + \mathfrak{D} \cos 2\zeta - \mathfrak{E} \sin 2\zeta},$$

$$(7) \quad \sin \delta = \mathfrak{A} \cos \delta + \mathfrak{B} \sin \zeta' + \mathfrak{C} \cos \zeta' + \mathfrak{D} \sin (2\zeta' + \delta) + \mathfrak{E} \cos (2\zeta' + \delta).$$

Cette dernière, pour $\delta < 20$ degrés, peut s'écrire, avec une approximation suffisante,

$$(8) \quad \delta = \underbrace{A + B \sin \zeta' + C \cos \zeta'}_{\text{Déviation semi-circulaire}} + \underbrace{D \sin 2\zeta' + E \cos 2\zeta'}_{\text{Déviation quadrantale}},$$

dont les coefficients sont approximativement proportionnels à ceux des équations (6) et (7); A, B et C sont à peu près les arcs dont les sinus sont \mathfrak{A} , \mathfrak{B} et \mathfrak{C} .

Ces derniers ont pour valeurs, en fonction des coefficients de Poisson,

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

Les coefficients \mathfrak{B} et \mathfrak{C} de la déviation semi-circulaire comprennent deux termes, le premier dépendant de l'induction verticale du

fer doux, le second du magnétisme permanent. Ils sont sujets à varier avec le temps, par suite de l'altération du magnétisme permanent, et avec la position géographique représentée par H et θ . Ils ont donc besoin d'être fréquemment déterminés.

\mathcal{O} est le principal coefficient de la déviation quadrantale. L'expérience le montre presque toujours positif. Dans ce cas, on peut le diminuer par une ou deux tiges de fer doux, disposées en travers du navire et à tribord et babord du compas.

Les coefficients \mathcal{A} et \mathcal{C} , liés intimement entre eux et aux valeurs de d et b , n'acquièrent de valeur sensible que lorsque le fer doux est placé dissymétriquement. \mathcal{A} , \mathcal{O} , \mathcal{C} et λ ne varient pas pour le même navire (avec la même position du compas), quelle que soit la position géographique.

Pour un lieu donné, en observant les déviations à un certain nombre de caps, on formera un égal nombre d'équations de condition de la forme (7), ou (8) si les déviations ne dépassent pas 20 degrés. On en déduira les coefficients par la méthode des moindres carrés, qui est d'une application très-facile, quand les observations correspondent à des caps également espacés entre eux.

Les coefficients connus et substitués dans la formule (6) permettent de trouver la déviation à un cap quelconque par le calcul. On peut aussi employer une construction graphique (dygogramme) ⁽¹⁾. En cours de navigation, il suffira de déterminer \mathcal{V} et \mathcal{E} en conservant pour \mathcal{A} , \mathcal{O} , \mathcal{C} , λ , les valeurs initiales. Il suffit, pour cela, de deux observations de déviations à deux caps cardinaux. On peut

(¹) On a admis, dans ce qui précède, qu'il n'y avait pas lieu de tenir compte de la composante verticale Z' des actions combinées de la terre et du navire. Cela est vrai quand le navire est droit; mais lorsqu'il est incliné, ou à la bande, la symétrie des actions par rapport au plan vertical du compas est dérangée. Quand le fer doux du navire est symétriquement distribué, le principal terme de l'erreur due à une inclinaison i est de la forme $Ji \cos \zeta'$; J dépend de la force verticale et des coefficients de la déviation quadrantale. On peut annuler ce coefficient en plaçant un aimant vertical sous le compas, à une distance que le calcul permet de déterminer sans faire incliner le navire. J dépend du lieu où a été construit le navire. Dans les navires construits dans notre hémisphère, la pointe nord de l'aiguille est généralement attirée vers le bas du navire. Quand celui-ci s'incline, cette force produit une composante horizontale qui attire la pointe nord vers le côté élevé, c'est-à-dire au vent. Le fer doux horizontal transversal produit le même effet dans l'hémisphère nord et l'effet inverse dans l'hémisphère sud. La correction par un aimant permanent n'est rigoureusement vraie que pour un lieu déterminé.

même remplacer une des observations de déviation par une observation de force horizontale, obtenue par la méthode des oscillations ou par tout autre procédé.

3. *Correction mécanique des compas.* — On peut donc connaître facilement les déviations ; mais il serait dangereux, comme on l'a vu, de laisser subsister des déviations trop grandes, surtout parce que l'aiguille à certains caps serait trop paresseuse : on a donc dû chercher les moyens de diminuer la grandeur des déviations. Cette question très-controversée s'éclaire très-simplement au moyen de la théorie de Poisson et de M. Archibald Smith. C'est à M. Airy que revient l'honneur d'avoir mis la science sur cette voie.

On ne mentionnera que pour mémoire l'idée d'un marin anglais proposant de désaimanter les navires en fer. Cette conception est irréalisable, et d'ailleurs on n'arriverait ainsi à détruire qu'une partie de la déviation semi-circulaire.

La déviation semi-circulaire a pour maximum $\sqrt{v^2 + \mathcal{E}^2}$. Elle peut être représentée par l'action d'un aimant qui, placé est et ouest avec un compas, le dévierait de cette quantité, et qui à bord ferait avec la quille un angle α , tel que $\text{tang } \alpha = \frac{\mathcal{E}}{v}$. Elle sera détruite pour un lieu donné en plaçant parallèlement à la direction α un aimant horizontal, directement opposé à cet aimant fictif et produisant ainsi à cette place une déviation égale et contraire à celle que produit le fer dur du navire. Une fois α calculé, on peut déterminer la distance de l'aimant au compas, au moyen d'expériences faites soit à terre, soit à bord. Ce procédé est employé dans la marine royale anglaise.

Le procédé de M. Airy, pour corriger cette déviation, est plus simple et plus facile. On emploie pour cela deux barreaux aimantés, l'un parallèle, l'autre perpendiculaire à la quille, et horizontaux tous deux. La position des aimants peut se déduire du calcul et d'expériences faites à terre ; il est plus simple de les placer par tâtonnement. Pour cela, le cap étant au nord magnétique, on amène l'aiguille à pointer exactement, en rapprochant ou éloignant un aimant transversal, puis on fixe celui-ci. On met ensuite le cap à l'est magnétique et l'on corrige la déviation à l'aide d'un aimant longitudinal. La correction sera exacte pour le sud et l'ouest.

On peut corriger la déviation quadrantale (généralement moins importante que l'autre) en disposant une ou plusieurs tiges de fer doux horizontal près du compas (*voir* ce qui est relatif au coefficient \textcircled{Q}). Cette correction, une fois faite, est bonne pour toutes les latitudes.

Enfin, en parlant de l'erreur due à la bande, nous avons indiqué un mode de correction.

Les modes de correction qui précèdent sont basés sur les formules de Poisson, et l'expérience en a confirmé la valeur. En fait, un opérateur exercé peut arriver à corriger un compas à $\frac{1}{2}$ degré près pour toutes les orientations. Le procédé est donc parfait *pour une latitude donnée*; ce qu'on y ajouterait ne serait qu'une superflétation parfois dangereuse.

Mais, en se reportant aux valeurs de \textcircled{B} et de \textcircled{C} , on verra qu'un aimant permanent ne saurait corriger l'action variable d'un lieu à un autre du magnétisme induit vertical, et l'exactitude de la correction est d'autant moindre que le navire se déplace davantage en latitude. Seulement la séparation des indéterminées c , f , P et Q exigerait au mois quatre observations faites en des latitudes différentes, et comme P et Q n'ont pas une constance absolue et dépendent du magnétisme sous-permanent, une tentative, pour corriger c et f avec du fer doux vertical et P et Q avec un aimant, ne pourrait être faite qu'avec une approximation douteuse et au bout d'une très-longue navigation, pendant laquelle on serait resté sans guide. Il est donc préférable de s'en tenir aux résultats que l'expérience a confirmés, en soumettant les compas corrigés à des vérifications aussi fréquentes que l'état du ciel le permettra, au moyen d'observations astronomiques.

Reste la difficulté de faire ces vérifications par ciel nuageux ou brumeux.

Divers essais ont été tentés dans cette voie; en France notamment, M. Raphaël, lieutenant de vaisseau, M. Dubois, professeur d'hydrographie, et, plus récemment, M. le lieutenant de vaisseau Fournier, ont indiqué des méthodes applicables à cet objet. J'ai moi-même donné un procédé (*voir Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 12 mai 1873) dont les principes consistent à remplacer les observations de déviation par des observations de force horizontale. Cette force peut s'évaluer, en eau calme, par la méthode des

oscillations; à la mer elle s'évalue en mesurant la déviation que subit l'aiguille sous l'influence d'un aimant mobile, disposé au-dessus du compas. On en déduit le rapport des valeurs de H' pour diverses orientations du navire, ou ces valeurs elles-mêmes, en tenant compte d'une constante instrumentale relative à l'aimant perturbateur, et la substitution dans les formules permet de calculer ou de construire \mathfrak{B} et \mathfrak{C} , puisque \mathfrak{A} , \mathfrak{D} , \mathfrak{E} , λ sont des constantes que l'on a pu déterminer au port de départ. Au moyen des constantes, on peut alors retrouver le tableau des déviations.

Le problème de la régulation est donc résolu dans tous les cas de la pratique, et les solutions appuyées sur l'analyse de Poisson sont rigoureuses en théorie.

Il eût été impossible de comprendre, dans le cadre restreint de cette étude, l'historique si intéressant de la science des déviations : c'est à peine si l'on a prononcé le nom de M. Airy, du D^r Scoresby et autres, qui l'ont tant fait progresser.

Nous renvoyons le lecteur aux Mémoires de Poisson, au *Cours de régulation des compas* de M. l'ingénieur hydrographe Darondeau (*Mémorial du génie maritime*, 1863), au *Manuel de l'amirauté anglaise*, par MM. Archibald Smith et Evans (traduction française par M. Collet, Dépôt de la Marine) et aux opuscules de M. Fournier.
