

Transition de la route magnétique à la route vraie dans l'aviation

Bart Banning*, **Anthony MacKay****, **Paul Hickley*****

*Association internationale des instituts de navigation
Amsterdam, Pays-Bas
Courriel : bart.banning@lvnl.nl

**NAV CANADA
Ottawa, Canada
Courriel : anthony.mackay@navcanada.ca

***Royal Institute of Navigation
Londres, Royaume-Uni
Courriel : iain@rin.org.uk

***Résumé :** L'utilisation du compas magnétique et du nord magnétique comme référence principale en navigation aérienne de nos jours entraîne des coûts évitables et de possibles problèmes de sécurité. Nous présentons une proposition de transition à la route et au cap vrais fondés sur le GNSS, y compris un plan en vue d'une stratégie de transition coordonnée à l'échelle internationale. Nous présentons les derniers résultats des recherches effectuées dans ce domaine et des initiatives de coordination avec les organismes internationaux.*

1. Introduction

L'Association internationale des instituts de navigation (IAIN) a lancé l'initiative de la transition à la route vraie dans l'aviation, transition déjà accomplie dans le monde maritime au siècle précédent. Il faudra un effort mondial pour réaliser la transition de la référence magnétique à la référence vraie, mais on croit que cet exercice ponctuel rendra l'aviation plus sécuritaire et beaucoup plus efficiente.

Nous mettrons à jour le présent document en vue de la conférence ENC de Dresden¹ pour qu'il tienne compte des dernières avancées et idées. Lors de la conférence de l'OACI tenue en 2019, il a été convenu que l'OACI ajouterait ce sujet à son programme de travail. Il reste encore à fixer une date et à établir un plan pour la transition à la route vraie.

2. Contexte

Si l'histoire était différente et que nous avions inventé le gyroscope il y a des centaines d'années mais que nous venions d'inventer le compas magnétique et que nous l'offrions comme moyen de rechange pour indiquer le cap, le monde de l'aviation le rejeterait.

L'orientation vraie, qu'on peut établir en mesurant la rotation de la Terre, offre une précision opérationnelle de l'ordre d'un dixième de degré et reste constante dans le temps. Par contraste, la précision instantanée du compas magnétique (c'est-à-dire le portrait pris

¹ European Navigation Conference 2020, tenue du 11 au 14 mai 2020 à Dresden (Allemagne).

à un moment donné) est probablement d'environ deux degrés. L'intégration sur des dizaines de minutes ou plus fait passer cette précision à environ un demi-degré. Fait plus important : la déclinaison magnétique (ou simplement la déclinaison, comme l'appellent couramment les aviateurs) varie en fonction du lieu et du temps, rendant nécessaire la mise à jour constante des procédures publiées.

Magnétisme terrestre. Selon le modèle simple utilisé habituellement pour visualiser le champ magnétique de la Terre, on imagine un barreau droit aimanté qui traverse la Terre, mais c'est une simplification grossière. La plus grande partie du magnétisme de la Terre est attribuable au fait que son noyau externe est une masse de métal fondu contenant une quantité considérable de minerais ferreux. La combinaison de la rotation de la Terre et des courants de convection dans ce liquide crée la géo-dynamo qui constitue la principale composante du champ. Le reste est attribuable aux anomalies magnétiques locales causées par des dépôts de minéraux solides, surtout de la magnétite, plus près de la surface de la Terre.

La déclinaison (ou déclinaison magnétique) est l'angle entre le nord vrai et le nord magnétique local. Plusieurs organisations géodésiques publient régulièrement des cartes de déclinaison magnétique du monde.

Comme on peut le constater, rares sont les régions du monde où la déclinaison est nulle; c'est pourquoi le problème de la gestion de la correction qu'elle nécessite à chaque instant et de son taux de variation est un enjeu international. Personne ne connaît la cause de la variation de la déclinaison et les tentatives de modélisation de cette variation échouent au-delà d'un certain point en raison de la complexité des équations. Tout ce qu'on peut faire, c'est observer ce qui s'est produit auparavant et extrapoler dans l'avenir immédiat. Comme dans le cas de la modélisation météorologique, plus on tente de prédire loin dans le temps, moins le modèle est précis.

Les pôles Nord et Sud magnétiques ne correspondent pas aux pôles véritables, qui sont les extrémités de l'axe de rotation de la Terre, et ils ne sont pas non plus antipodaux. Par exemple, en 2015, le pôle Nord magnétique se trouvait à environ 87°N 150°O, tandis que le pôle Sud magnétique était autour de 65°S 137°E – tellement loin du pôle vrai qu'il n'était même pas sur le continent de l'Antarctique.

Fait plus important : les pôles magnétiques se déplacent constamment. À l'aéroport d'Oxford, par exemple, la déclinaison en 1942 était de 11°O. En 2015, elle était d'environ 1°O. Elle a donc varié de 10° en quelque 73 ans, ce qui donne un taux moyen sur cette période de 1 degré tous les 7,3 ans. Ailleurs dans le monde, les taux de variation diffèrent, tout comme la rapidité avec laquelle ces taux accélèrent ou ralentissent.

On peut trouver sur Internet des animations illustrant les fluctuations des lignes isogones de 1590 à 1990.

Même si on peut voir que le déplacement est très accéléré, l'animation présente bien le principe général. Tenter de fonder une structure aussi compliquée que notre réseau aérien international moderne sur ça, c'est comme essayer de construire une cathédrale sur du sable mouvant.

Par ailleurs, l'utilisation du compas magnétique est totalement impossible dans certaines régions du monde. Près des pôles, les lignes de flux du champ magnétique de la Terre forment un angle très prononcé avec la surface de la Terre. Le terme scientifique désignant cet angle est *inclinaison*, mais les aviateurs l'appellent aussi « angle de chute ». Près des pôles, la composante horizontale passe sous 6 microteslas, le seuil généralement accepté en-deçà duquel on ne peut plus utiliser le compas magnétique. La zone nordique où les valeurs sont inférieures à 6 microteslas est assez étendue. Dans l'hémisphère sud, cette zone est encore plus grande.

On constate aussi des variations imprévisibles de la déclinaison. Des éruptions solaires peuvent se propager vers la Terre, particulièrement en période d'activité intense des taches solaires. Elles traversent rapidement la magnétosphère de la Terre, mais leurs effets sont remarquables. Lors du summum du dernier cycle de 11 ans des taches solaires, on a observé pendant plusieurs heures des anomalies de déclinaison allant jusqu'à 7°.

Pratiques actuelles et exceptions. Malgré ces limites, on utilise l'orientation magnétique comme référence pour les instructions, les procédures et le contrôle de l'aviation, y compris les voies aériennes, les routes d'approche et les axes de piste. Lorsque la déclinaison varie de plus d'un degré, il faut republier la documentation imprimée relative aux pistes et aux approches. Toutefois, on établit l'orientation magnétique des pistes en l'arrondissant à la dizaine de degrés la plus proche vers le haut ou le bas, puis en l'exprimant par un numéro à deux chiffres. Par exemple, 195° arrondi vers le haut devient 200°, donc le numéro de piste 20, tandis que 194° est arrondi vers le bas à 190° et donne le numéro de piste 19. Au besoin, il faut alors repeinturer les gros numéros blancs sur les pistes principales et fermer le terrain d'aviation pendant l'exécution des travaux. Prenons la situation de Tampa, en Floride, lorsqu'on a redésigné les pistes en janvier 2011. Les axes des pistes parallèles nord et sud, dont l'orientation est 006,0°V, allaient de 36 à 01. Selon la FAA, la déclinaison à Tampa en 2005 était de 4,3°O avec une variation annuelle d'environ 0,1°O. Les numéros auraient dû changer dès que la déclinaison magnétique a atteint 3,5°O, ce qui s'est produit en 1998. Par conséquent, même à l'époque, les pistes auraient dû porter les numéros 01 et 19, mais jusqu'en 2011 elles étaient numérotées 36 et 18. En janvier 2011, l'aéroport a enfin renuméroté non seulement les pistes, mais aussi quelque 100 panneaux de signalisation et 40 autres panneaux!

Pourquoi l'aéroport a-t-il attendu 13 ans avant de se conformer enfin à une pratique établie prévue par la loi? On ne peut que conjecturer, mais une des raisons pourrait être qu'il devait fermer pendant une semaine pour repeinturer les pistes. Cela aurait représenté une importante perte de revenus pour un si grand aéroport et il a peut-être retardé le moment d'attaquer le problème jusqu'à ce qu'il ne puisse vraiment plus l'ignorer.

Les autres applications clés utilisant le nord magnétique comme référence sont les aides à la navigation où l'information sur le relèvement est saisie à la station au sol, soit VDF, VOR et le TACAN militaire.

Nous avons décidé d'adopter cette convention basée sur l'usage et la tradition, mais nous l'abandonnons lorsqu'elle devient inapplicable. Aux latitudes supérieures à environ 60°, les trajectoires et les routes des cartes publiées sont indiquées en valeurs vraies en raison de la faiblesse de la composante horizontale du champ magnétique et du fait qu'elle varie si rapidement en fonction du lieu et du temps. On présume tout simplement que les aéronefs qui volent à une latitude élevée ou polaire sont munis d'un système de navigation qui leur

permet de fonctionner avec les valeurs vraies ou de quadrillage. Certains VOR de latitude élevée sont orientés par rapport au nord vrai. Près de Resolute Bay (Canada), la déclinaison varie de 10°O à 90°O sur environ 200 milles marins. Une route en ligne droite indiquée sur cette carte produirait une variation magnétique de 80° sur cette distance. Tous les utilisateurs de ce VOR doivent fonctionner avec les valeurs vraies.

3. Transition aux valeurs vraies

Maintenant, voyons comment faire le ménage dans cette situation. La solution évidente consiste à convertir toutes les orientations des instructions, des procédures et du contrôle de l'aviation en valeurs vraies, puisqu'il faut les utiliser près des régions polaires de toute façon. Examinons les répercussions que cela aurait sur :

- les avions de ligne;
- les aéronefs munis d'un gyrocompas magnétique, c'est-à-dire un bon gyro asservi à une sonde magnétométrique;
- les aéronefs munis d'un gyroscope directionnel réinitialisé manuellement pour qu'il agisse comme un compas à lecture directe;
- les aéronefs munis d'un compas à lecture directe seulement.

Avions de ligne. Tout avion de ligne mis en service il y a moins de 45 ans utilise un système de navigation gyroscopique par inertie. Deux ou parfois trois systèmes de référence par inertie déterminent le cap vrai en mesurant la direction de la rotation de la Terre. Dans le système de gestion de vol moderne, tous les calculs de trigonométrie sphérique servant à déterminer les trajectoires souhaitées et tous les calculs des données de position en latitude et en longitude utilisent les valeurs vraies. Par conséquent, la direction magnétique est inutile aux seules fins de la navigation et le système ne comporte pas de capteur magnétique ou de sonde magnétométrique.

Cependant, aux fins de compatibilité avec les procédures de contrôle de la circulation aérienne, l'aéronef doit pouvoir fonctionner avec les valeurs magnétiques. Ainsi, le système de référence par inertie (IRS) contient une base de données comprenant les valeurs de déclinaison par rapport à la latitude et à la longitude. Remarquez que cela représente l'inverse de la situation traditionnelle, où l'on captait le cap magnétique et la déclinaison servait à le convertir en cap vrai aux fins de navigation. Présentement, on capte le cap vrai et on utilise la déclinaison en sens inverse pour calculer le cap magnétique aux fins des procédures de circulation aérienne.

Le problème est que la déclinaison varie dans le temps. La base de données est établie pour le milieu de la décennie où l'IRS est créé; par exemple, créé en 1981 et réglé pour 1985, créé en 1992 et réglé pour 1995, etc. Si l'on ne met pas à jour la base de données, l'information devient périmée. Malheureusement, la mise à jour est dispendieuse et le transporteur aérien n'a pas de raison impérative de l'effectuer.

Il est difficile de déterminer la fréquence à laquelle ces bases de données sont réellement mises à jour et, évidemment, tout transporteur aérien qui laisse les données devenir périmées sera réticent à donner des détails sur ses « processus internes ». Toutefois, un pilote d'un transporteur aérien était si préoccupé qu'il a effectué une série de lectures sur une période de 20 mois de 2006 à 2008 afin de confirmer ce qui n'était par ailleurs

qu'anecdotique : le cap indiqué par l'EFIS de sa flotte était presque toujours supérieur à celui de l'axe de piste publié. Il volait en Europe de l'Ouest, où la déclinaison vers l'ouest diminuait en fonction du temps, et le cap magnétique indiqué était trop élevé si la base de données de correction était périmée.

Voici ses données. Il a fait 364 lectures, un nombre assez raisonnable. La moyenne est $+2,854^\circ$, mais le mode est plus important, à 4° , surtout qu'il arrondissait la lecture au degré le plus proche. Il doit exister une explication à cet écart positif si important par rapport à zéro, et de loin la plus plausible est que les bases de données de déclinaison étaient périmées.

Est-ce important? Est-ce que cela change quelque chose pour la sécurité? Dans le cas des approches ILS et VOR, probablement pas, puisque l'aéronef suit un signal de déviation par rapport à l'axe ILS ou à la radiale du VOR, des trajectoires au-dessus du sol qui ne varient pas. Cependant, dans l'ADF, c'est le cap de l'aéronef qui positionne l'aiguille ou son équivalent électronique moderne. Dans le cas d'une descente vers un NDB, la procédure bien établie permet à l'aéronef d'entamer la descente seulement s'il est à au plus 5° de l'axe, car l'altitude minimale de descente est fondée sur le terrain dans ce contexte. Si le cap de référence accuse un écart de 4° à cause de la valeur artificielle faussée de la déclinaison, il semble possible que les marges de sécurité soient érodées; il faut donc en tenir compte avant d'examiner toute autre source d'erreur.

De plus, le système de correction de déclinaison de l'IRS et du FMS n'est pas disponible aux latitudes élevées. Les fabricants acceptent que près des pôles, la valeur de la déclinaison et le taux de variation sont si élevés qu'il serait dangereux de le rendre disponible. Par conséquent, aux latitudes situées au nord de 73°N et au sud de 60°S , seuls les routes et les caps vrais sont affichés. À ces latitudes, la base de données magnétiques est inhibée et tout le monde vole en utilisant les valeurs vraies.

Ces régions deviennent de plus en plus importantes pour le transport aérien normal des passagers. Il y a 35 ans, si vous deviez voler de Moscou à Vancouver, vous suiviez une trajectoire dans des latitudes tempérées. Aujourd'hui, ce serait très différent.

Les aéronefs modernes peuvent voler pendant 12 ou 13 heures, ce qui leur donne une autonomie d'environ 5 000 milles par étape, voire davantage. Ils sont exceptionnellement fiables et la probabilité d'un atterrissage imprévu sous climat inhospitalier est très faible. Mais, fait plus important, les systèmes de navigation à gyroscope nous permettent de traverser le pôle et de raccourcir certains déplacements de milliers de milles.

Aéronefs munis d'un gyrocompas magnétique. Regardons maintenant les aéronefs qui utilisent un gyrocompas magnétique classique, c'est-à-dire comportant une sonde magnétométrique, comme celle qu'on pourrait trouver dans un avion-taxi. En fait, ce problème de l'utilisation du gyrocompas magnétique avec les valeurs vraies a déjà été traité. Dans les années 50 et 60, les compas étaient magnétiques, mais les systèmes automatiques de navigation à l'estime qui utilisaient Doppler exigeaient des données d'entrée en valeurs vraies pour être compatibles avec un graticule de latitude et de longitude. La plupart des compas des gros aéronefs de cette période permettaient l'entrée manuelle de la déclinaison pour donner une lecture vraie au matériel de navigation et, dans bien des cas, au cadran du compas lui-même afin que le pilote puisse suivre un cap vrai au moyen du compas.

Cette fonction a progressivement disparu dans les gyrocompas magnétiques produits autour de 1970 et par la suite parce que les indicateurs de position au sol Doppler étaient devenus numériques et qu'il était plus simple de régler la déclinaison dans l'ordinateur d'affichage que dans le compas. Toutefois, si nous adoptions les valeurs vraies, la demande ressusciterait et il serait facile pour les fabricants de rétablir cette technologie cinquantenaire bien établie dans les gyrocompas magnétiques modernes.

Aéronefs munis d'un gyroscope directionnel (DGI). Nous abordons maintenant les aéronefs utilisant à la fois le compas magnétique à lecture directe et le DGI. Ce sont les moins problématiques. Le DGI, qui n'a pas d'entrée magnétique directe, est simplement réglé par le pilote selon n'importe quelle référence requise. Normalement, il s'agit de l'orientation magnétique. Il suffirait que le pilote applique la déclinaison locale à chaque réinitialisation du DGI, qu'il effectue normalement environ toutes les 15 minutes. La communauté des aéronefs légers n'a absolument rien à craindre d'un tel changement.

Aéronefs munis d'un compas à lecture directe seulement. Pour les aéronefs n'ayant qu'un compas magnétique, soit principalement ceux de la communauté des ultralégers, la seule véritable option consisterait à appliquer mentalement la déclinaison. En général, ces aéronefs tendent à demeurer dans un rayon d'une centaine de milles de leur base, et il est facile de se rappeler une seule valeur de déclinaison et de l'appliquer chaque fois.

VOR. La déclinaison à un VOR est réglée à la station au sol. On peut facilement la modifier en changeant le signal de référence; de fait, il faut présentement l'ajuster chaque fois que la déclinaison varie. Il est donc déjà possible de passer du nord magnétique au nord vrai. Contrairement à la situation actuelle, une fois le réglage effectué, il ne serait plus nécessaire de le refaire.

De fait, au R.-U., toute modification des VOR exigera moins de travail qu'auparavant. Les NATS proposent de réduire le nombre de VOR du R.-U. de 46 à 19 au cours des cinq prochaines années. Manifestement, ils croient que tous les aéronefs commerciaux sont maintenant munis d'un type d'équipement de navigation de surface et qu'un grand nombre de pilotes privés utilisent un GPS.

GNSS. Le récepteur GNSS établit sa position en fonction de la latitude et de la longitude, qui sont fondées sur le nord vrai. Grâce à l'extrême précision du système, le récepteur peut, en intégrant des repères successifs sur une courte période, calculer sa route vraie, qui peut être affichée sous forme numérique ou comme un marqueur de route sur une visualisation cartographique mobile.

Le coût d'un récepteur GNSS pourrait correspondre à peu près à celui d'une heure de vol d'un aéronef léger. De fait, il serait plus économique qu'un simple compas à lecture directe. Puisque la route vraie est maintenant disponible dans cette fourchette de prix, pourquoi quelqu'un voudrait-il le cap magnétique, sauf peut-être comme système de rechange en cas de panne de courant?

4. Justification de la transition aux valeurs vraies

La justification de la transition aux valeurs vraies comme référence pour les instructions, les procédures et le contrôle de l'aviation est claire, et les seuls inconvénients seraient ceux

de sa mise en œuvre dans la pratique. Bien que l'initiative serait énorme et coûteuse, il s'agirait d'une opération unique qui, une fois terminée, serait définitive, contrairement à la situation actuelle, qui est également coûteuse mais persistante.

Le plus gros obstacle à la mise en œuvre éventuelle de ce changement à l'échelle mondiale serait l'inertie – le grand nombre de pays concernés et la difficulté de trouver la volonté de changer tous en même temps. Certains de ces pays n'ont pas un secteur de l'aviation sophistiqué pouvant traiter facilement cette question, tandis qu'ailleurs, notamment aux États-Unis, l'ampleur même du changement serait phénoménale et pourrait susciter l'opposition d'un lobby général de l'aviation plutôt conservateur. Parmi les voies possibles de réalisation du changement, on peut imaginer qu'un pays exprimerait un désaccord avec l'OACI et changerait unilatéralement. Lorsqu'il aurait prouvé que le système fonctionne sans problème, on pourrait s'attendre à ce que d'autres suivent progressivement.

Cela ne serait pas sans précédent. Certains pays utilisent le pied comme unité d'altitude alors que d'autres utilisent le mètre. Certains utilisent l'hectopascal comme unité de pression atmosphérique; d'autres utilisent le pouce de mercure, et ainsi de suite. Il n'y aurait pas de différence de principe si certains utilisaient les valeurs magnétiques et d'autres, les valeurs vraies.

De fait, un pays a déjà pris l'initiative. Le taux de variation de la déclinaison, tant en fonction du temps que de la position, est si élevé dans certaines régions du Canada que, lors de la 12^e conférence de l'OACI tenue à Montréal en novembre 2012, NAV CANADA, l'organisme propriétaire et exploitant du système de navigation aérienne civile du Canada, a présenté un document de travail où l'on pouvait lire ce qui suit :

***4.3.5 Navigation par rapport au nord vrai seulement.** NAV CANADA poursuit uniquement son analyse de l'utilisation de la navigation par rapport au nord vrai pour les opérations aériennes. Des efforts considérables sont consacrés à la mise à jour de l'information aéronautique en fonction des variations de la déclinaison magnétique (MAGVAR). Les équipements modernes effectuent des calculs de navigation par rapport au nord vrai, puis convertissent l'information pour donner au pilote une indication de cap magnétique (en appliquant une déclinaison magnétique qui repose sur un modèle magnétique), de cap vrai ou de route vraie, selon les capacités de l'aéronef. Pour des raisons de sécurité il a fallu, au cours des derniers mois, refaire d'urgence la peinture de numéros de pistes en raison de « données MAGVAR périmées ». Il a même fallu annuler des approches de catégories CAT I à CAT III en raison d'un changement de MAGVAR et de références MAGVAR périmées à bord des aéronefs (remontant parfois à 2005) dans certains États. NAV CANADA est d'avis que toutes les opérations effectuées par rapport au nord vrai amélioreraient la sécurité et permettraient des économies considérables en évitant la mise à jour des données liées à la MAGVAR.*

Le document présente ensuite la recommandation suivante (d'autres recommandations non liées au présent sujet sont omises de la citation) :

6.2 La Conférence est invitée à adopter la recommandation suivante : (...)

Il est recommandé que la Conférence demande à l'OACI : (...)

d'évaluer l'usage de la navigation par rapport au nord vrai comme référence standard.

L'IAIN est d'avis que la justification de la transition au nord vrai comme référence pour les instructions, les procédures et le contrôle de l'aviation est claire. Les seuls inconvénients seraient ceux de la mise en œuvre d'un tel changement dans la pratique. Bien que l'initiative serait énorme et coûteuse, il s'agirait d'une opération unique qui, une fois terminée, serait définitive, contrairement à la situation actuelle, qui est également coûteuse mais persistante.

5. Développements récents

L'IAIN a constitué un groupe de travail chargé de coordonner les travaux sur ce sujet et de le faire connaître à l'échelle mondiale. Il collabore présentement avec la CANSO et certains fournisseurs de SNA. Il travaille également avec l'IATA et l'OACI. Le but : fixer une date future, p. ex. 2035, et progresser vers elle de façon harmonisée.

Plusieurs fournisseurs de SNA ont réalisé des études ces dernières années. Elles comprenaient des vols d'essai. Les résultats étaient tous favorables au changement.

Récemment, le champ magnétique de la Terre a été mentionné dans les nouvelles parce qu'il se déplace différemment, plus rapidement qu'auparavant. Cela a motivé une mise à jour provisoire additionnelle du Modèle magnétique mondial. L'attention que le public a prêtée à cette question pourrait aider à présenter le message.

De nos jours, on conçoit les aéronefs, les systèmes de surveillance et les procédures de vol aux instruments en tenant compte des routes vraies. Il semble être grand temps d'abandonner la pratique consistant à toujours les convertir en valeurs magnétiques pour aucune raison pratique.

Références

- [1] X. Mustermann, Y. Wellknown, and Z. Pfiffig, « New research in magnetic field », *Proc. of 2010 Very Important Radar Conference*, Bigcity, Incountry, juin 2010, vol. 3, p. 210-214.
- [2] H. R. Hertz, « Ueber sehr schnelle magnetische Schwingungen », *Annalen der Physik*, mai 1887, vol. 267, n° 7, p. 421-448.
- [3] J. C. Maxwell, *A Treatise on Magnetism and Electric Youth*, 3^e éd., vol. 2. Oxford : Clarendon, 1892, p. 68–73.