

Positionnement en mer et navigation pour les géosciences

Jacques DEVERCHÈRE & François MICHAUD

Géosciences Azur, UMR 6526,
Observatoire océanologique
Université Pierre et Marie Curie
Villefranche-sur-Mer
jack@obs-vlfr.fr
micho@obs-vlfr.fr

Mots clés : cartographie, ellipsoïde de référence, estime, géosciences marines, GPS, positionnement, précision, projection, radionavigation, satellite.

Résumé

Ce cours ne reprend pas en détail les traités de navigation : son but est simplement de donner les éléments essentiels nécessaires à la compréhension des problèmes de positionnement et de navigation qui se posent couramment lors des campagnes en mer, tout particulièrement dans le domaine des géosciences marines. Il est à considérer comme une introduction pour les étudiants devant se rendre pour la première fois à bord d'un navire océanographique. Les pistes données ici pourront être utilement développées et approfondies en consultant les quelques ouvrages fournis dans la liste de références, en fin d'article. Notre souci constant a été d'attirer l'attention sur des aspects mal connus, mal compris, ou fréquemment négligés, dans le domaine de la navigation appliquée aux géosciences.

Position finding at sea and navigation for geoscience workers

Keywords : cartography, reference ellipsoid, dead reckoning, marine geosciences, GPS, position finding, precision, projection, radionavigation, satellite

Abstract

This course is not meant to replace any part of the navigation treatises:

its aim is simply to provide those elements required to understand the problems of position finding and navigation that frequently occur during sea cruises, and particularly during those for geosciences. It should be considered as an introduction for students having to embark for the first time aboard an oceanographic research ship. Tips given here may usefully be developed in greater detail by consulting the works given in the list of references at the end of the article. Our constant preoccupation has been to draw attention to aspects poorly known, misunderstood, or too frequently ignored, in the field of navigation as applied to geoscience cruises.

Introduction : géosciences marines, positionnement et cartographie

1. Besoins de positionnement en géosciences marines

L'exploration des océans à des fins de connaissance géophysique et géologique n'a cessé de progresser depuis les années cinquante. Son évolution est marquée par l'étroite dépendance dans laquelle elle se trouve vis-à-vis des découvertes et innovations technologiques. Les besoins de l'industrie pétrolière jouent bien sûr un rôle très important dans cette évolution ; ceux de la recherche académique diffèrent parfois, et ont stimulé le développement de certaines mesures géophysiques, notamment depuis l'espace (citons par exemple les satellites altimétriques *Topex-Poséidon*, *Seasat*, *Geosat*).

Dans ce contexte, il faut d'abord se rappeler que c'est la mesure géophysique en mer qui a fondé le postulat (révolutionnaire en 1966) de la tectonique des plaques, par l'analyse des anomalies magnétiques successivement positives et négatives quand on s'éloigne de l'axe des dorsales océaniques. C'est encore elle qui, dans les années 80, a permis une analyse morphologique et structurale nouvelle des grands fonds océaniques, notamment dans les fosses péripacifiques, par la bathymétrie Sea Beam (multifaisceaux) et les plongées en submersible.

Ce type d'exploration est toujours indispensable aujourd'hui, pour trois raisons essentielles :

— d'abord parce que les mesures faites depuis l'espace (dont les avantages sont la densité de couverture, l'homogénéité et la répétabilité) ne peuvent

fournir qu'une information complémentaire de celle que l'on obtient depuis la surface de la mer, car le satellite est trop loin des objets observés ;

— ensuite parce que l'imagerie des structures géologiques par les méthodes indirectes (ultrasonores et sonores : imagerie sous-marine et sismique marine) reste toujours irremplaçable pour la connaissance des structures terrestres superficielles (de quelques mètres à quelques dizaines de kilomètres), et une nécessité, eu égard à l'immensité des surfaces à couvrir (72 % de la surface du globe) et à la diversité des phénomènes géodynamiques à décrire (subductions, accrétions océaniques, dynamiques sédimentaires, etc.) ;

— enfin parce que l'observation directe des objets géologiques (plongées en submersible, dragages, carottages, forages) constitue la phase ultérieure de cette exploration, qui apporte un contrôle indispensable des données fournies par les méthodes indirectes, et ne peut être remplacée par aucune autre.

Dans ces perspectives, se positionner de la façon la plus précise possible en mer est un problème toujours actuel dont il faut d'abord bien saisir la spécificité par rapport au même besoin à terre : il n'existe pas de repérage topographique précis directement utilisable, ni même une stabilité de position dans le temps et l'espace. Ensuite, l'évolution des outils à la mer vers une sophistication sans cesse croissante exige un positionnement de plus en plus précis, que ce soit par rapport à un référentiel extérieur ou entre les différents maillons d'une chaîne d'acquisition (une trace sismique par rapport aux sources d'émission, un submersible ou un système acoustique remorqué par rapport au navire, une tête foreuse d'un train de tige par rapport au cône d'entrée du puits de forage, etc.).

Pour toutes ces raisons, il est très important pour le géophysicien ou le géologue marin de savoir quelles possibilités existent aujourd'hui pour se positionner et se déplacer à la surface des océans, et quelle précision peut être obtenue, notamment loin des côtes (navigation hauturière). Deux besoins bien différents doivent être distingués :

— Il faut positionner le mieux possible le navire et ses instruments en temps réel : c'est le cas d'une majorité de travaux effectués en géosciences marines et dans l'exploration pétrolière, par exemple lorsque l'on doit se déplacer à vitesse constante le long d'un profil avec une nappe (*array*) de sources sismiques et plusieurs flûtes (*streamers*) traînées à l'arrière du navire sur plusieurs kilomètres. Cela suppose une capacité à connaître et à analyser sa position et sa vitesse à tout instant, afin d'ajuster au mieux son déplacement et celui des instruments de mesure. Malgré l'usage du pilotage automatique, le rôle de l'équipage reste primordial, notamment pour la surveillance du parcours, de l'acquisition des données et de l'environnement marin ;

— Il faut recalculer *a posteriori* la route effectivement suivie, afin d'éliminer de fréquents artefacts dans la navigation, interpoler les données de position

en fonction d'autres paramètres (instants de tirs par exemple) et procéder à l'archivage des données. Cette seconde phase est également essentielle et justifie une acquisition très régulière et « contrôlée » des données de navigation.

Le problème de la précision du point obtenu à un instant donné doit donc être une des préoccupations majeures du géophysicien marin. Le premier souci devra concerner l'évaluation de la précision d'un point reporté sur une carte.

2. Du point en mer à la carte : une succession d'approximations

2.1. Quelle surface de référence choisir (du géoïde à l'ellipsoïde) ?

Pour se positionner à la surface de la terre, il est indispensable avant toute chose de définir une surface de référence simple.

Bien que paraissant la plus naturelle, car directement accessible, la surface terrestre ne convient pas : elle est irrégulière (figure 0.1a) et évolue dans le temps, ne serait-ce que par l'érosion du relief. Elle ne saurait donc être une surface de référence.

On pourrait choisir la surface des océans : le géoïde, surface équipotentielle du champ de gravité terrestre (figure 0.1a) ramenée au niveau zéro moyen des mers. Mais le géoïde reflète les anomalies de répartition de masse à l'intérieur de la Terre et n'est donc pas une surface simple à déterminer (figure 0.1b).

On opte généralement pour un ellipsoïde de révolution centré sur l'axe nord-sud, aplati au pôle et légèrement bombé à l'équateur (figure 0.1c). Pour une région donnée, les coordonnées des points sont déterminées par le choix des caractéristiques de l'ellipsoïde. Le même point n'aura pas les mêmes coordonnées suivant l'ellipsoïde utilisé (il en existe quatre principaux utilisés en navigation). Chaque carte ou système de positionnement doit donc porter la mention de l'ellipsoïde utilisé.

Malheureusement, d'un système d'ellipsoïde à l'autre, on peut avoir des décalages allant jusqu'à 110 mètres sur l'horizontale et 125 mètres sur la verticale : cette source d'erreur est souvent sous-estimée voire simplement ignorée par les utilisateurs. Plusieurs problèmes de report peuvent se poser :

— Reporter un point, dont les coordonnées sont données par rapport à un ellipsoïde, sur une carte qui est établie à partir d'un ellipsoïde différent. Actuellement, les cartes marines françaises sont établies à partir de l'ellipsoïde de Hayford (système dit Europe 50). Le système de positionnement GPS (voir ch. 2 § 5) utilise généralement (par défaut) un ellipsoïde dit WGS 84 (World Geodetic System 84). Il y a donc un décalage systématique dans le report de la position du point donnée par le GPS sur la carte, qui peut être de l'ordre de la centaine de mètres. Pour éviter cette erreur très fréquemment ignorée,

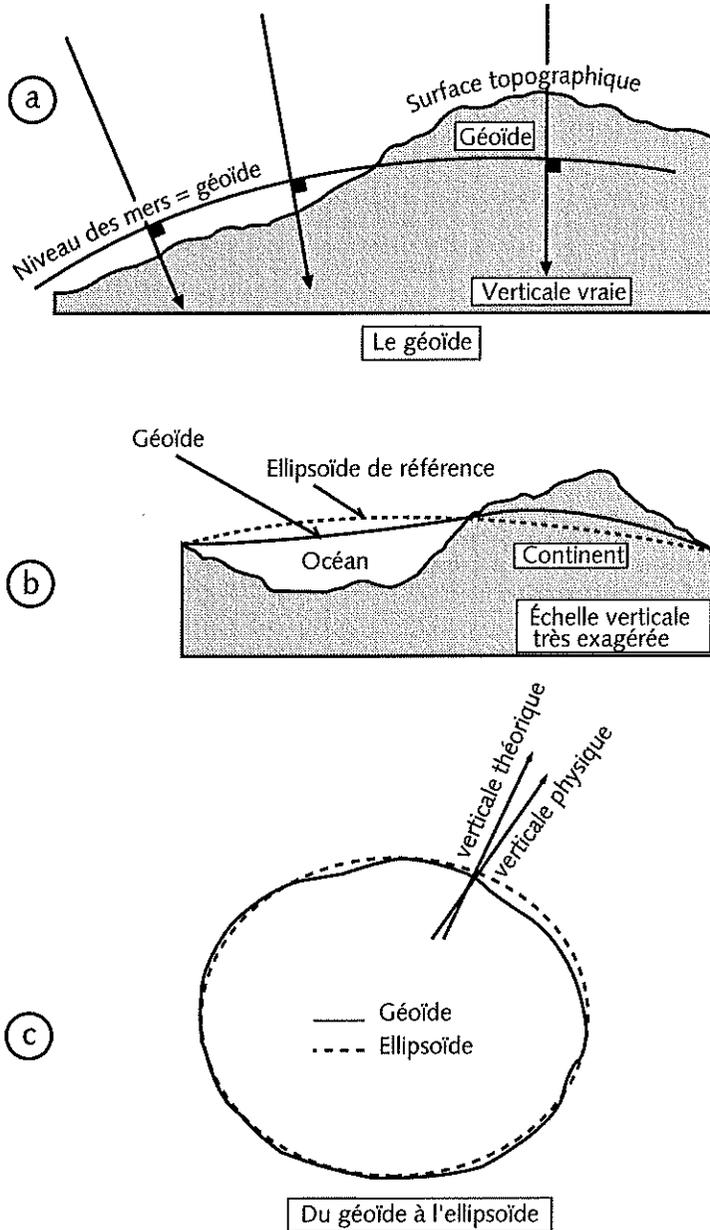


Figure 0.1: La surface terrestre, le géoïde et l'ellipsoïde de référence. a. — le géoïde correspond au niveau moyen des mers prolongé sous les continents. b. — L'ellipsoïde de référence, quel qu'il soit, ne correspond pas exactement au géoïde, car il ne prend pas en compte la topographie terrestre et les variations latérales de masse à l'intérieur de la Terre. c. — Il en découle qu'en un point donné, la verticale obtenue par l'ellipsoïde de référence peut différer de la verticale physiquement mesurable.

l'ensemble des cartes marines est en train d'être réédité en prenant comme surface de référence la même surface que celle du GPS. Certains récepteurs GPS peuvent aussi proposer de changer d'ellipsoïde de référence.

— Représenter une base de données disponible suivant une surface de référence donnée dans un autre référentiel. Par exemple, les données d'altimétrie (mesure des anomalies du géoïde de courte longueur d'onde permettant d'accéder à certains détails de la morphologie du fond marin) sont localisées par rapport à une surface de référence sphérique. Il faut donc, si on veut les représenter, utiliser la même surface ou convertir les données pour obtenir leur position par rapport à une autre surface de référence.

— Reporter des données géophysiques (gravimétrie, magnétisme, profils sismiques) ou bathymétriques (sondeurs mono- ou multifaisceaux) provenant de sources différentes et positionnées par rapport à des surfaces de référence différentes. Il faut harmoniser et traiter les données en choisissant une surface de référence commune pour obtenir une cohérence dans la représentation.

2.2. Comment repérer un point de la surface de référence ?

La nécessité de situer un lieu sur la surface de la Terre aboutit à mettre en place un système de coordonnées géographiques, qui sont la latitude et la longitude. La surface de référence est quadrillée par de grands cercles passant par les pôles (les méridiens) et des cercles parallèles à l'équateur (les parallèles) (figure 0.2).

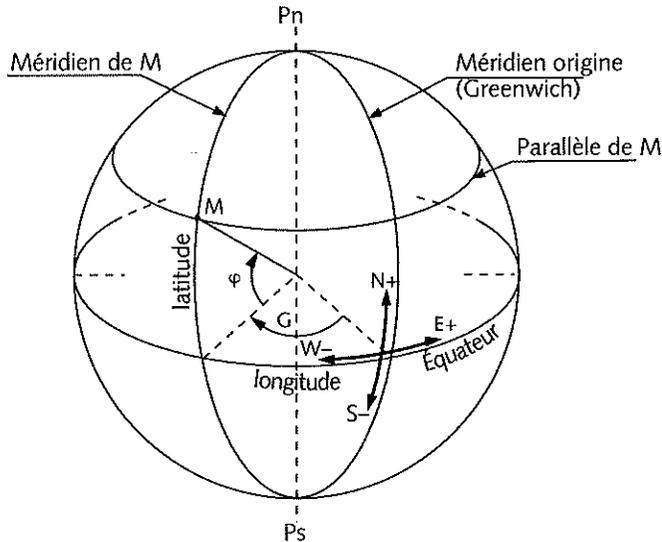


Figure 0.2 : Définition des coordonnées géographiques φ (latitude) et G (longitude).

Échelle des distances

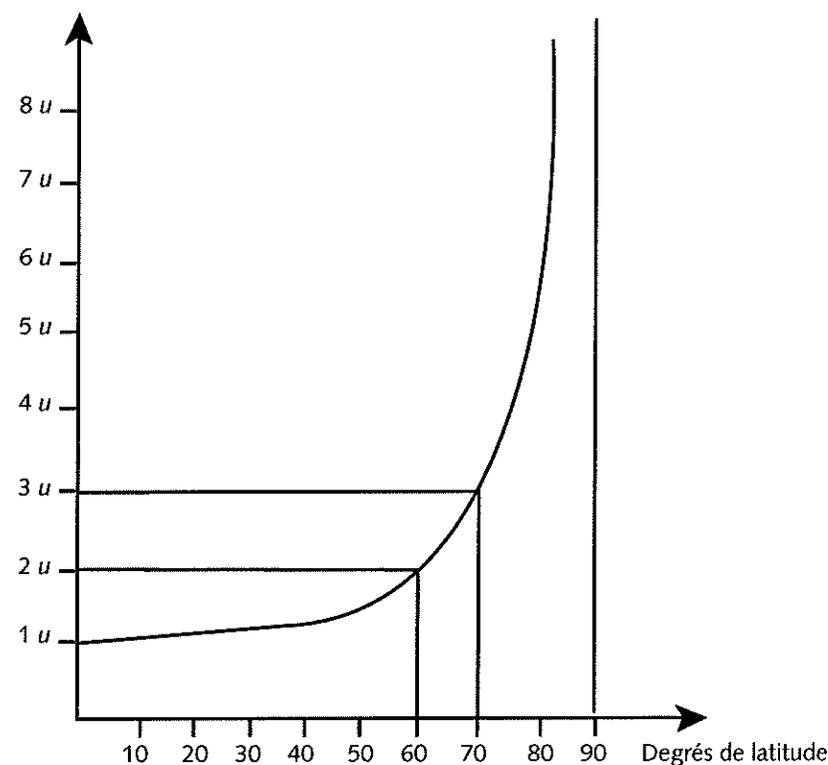


Figure 0.3 : Variation de l'échelle des distances en fonction de la latitude φ , ici en projection de Mercator. L'unité de la carte est u , longueur en millimètres représentant une minute de longitude sur la carte.

Dans ce système, la latitude d'un point est la distance angulaire (en degré et minute de méridien) mesurée à partir de l'équateur jusqu'au point considéré. La latitude est comptée négativement dans l'hémisphère sud entre 0° (équateur) et -90° (pôle sud) et positivement dans l'hémisphère nord. La longitude d'un point est la distance angulaire (en degré et minute de parallèle) mesurée à partir du méridien de Greenwich jusqu'au point considéré. Elle est comptée positivement vers l'est (entre 0 et 180° E) et négativement vers l'ouest (entre 0° et -180° W).

Ces définitions ne sont pas sans conséquence sur la définition de l'unité de distance en navigation. En effet, si l'on assimile la Terre à une sphère, un arc d'une minute de méridien (mesure de latitude) représente une distance constante quelle que soit la latitude à laquelle on se trouve. Cette distance,

qui vaut 1 852 mètres, est appelée le mille marin. La forme de la Terre étant en réalité plus proche d'un ellipsoïde que d'une sphère, la surface de référence généralement choisie est un ellipsoïde. En conséquence la valeur du mille marin varie légèrement avec la latitude; c'est pourquoi on convient de la définir à 45° (N ou S).

Au contraire, un arc d'une minute de parallèle (mesure de longitude) est variable. Plus on se rapproche du pôle, plus la distance représentée par un arc de parallèle est courte.

En conclusion, on mesurera les distances le long des méridiens par l'écart des latitudes car on sait que $1' = 1\,852\text{ m}$. Il découle de cette convention que l'échelle des distances variera en fonction de la latitude (figure 0.3).

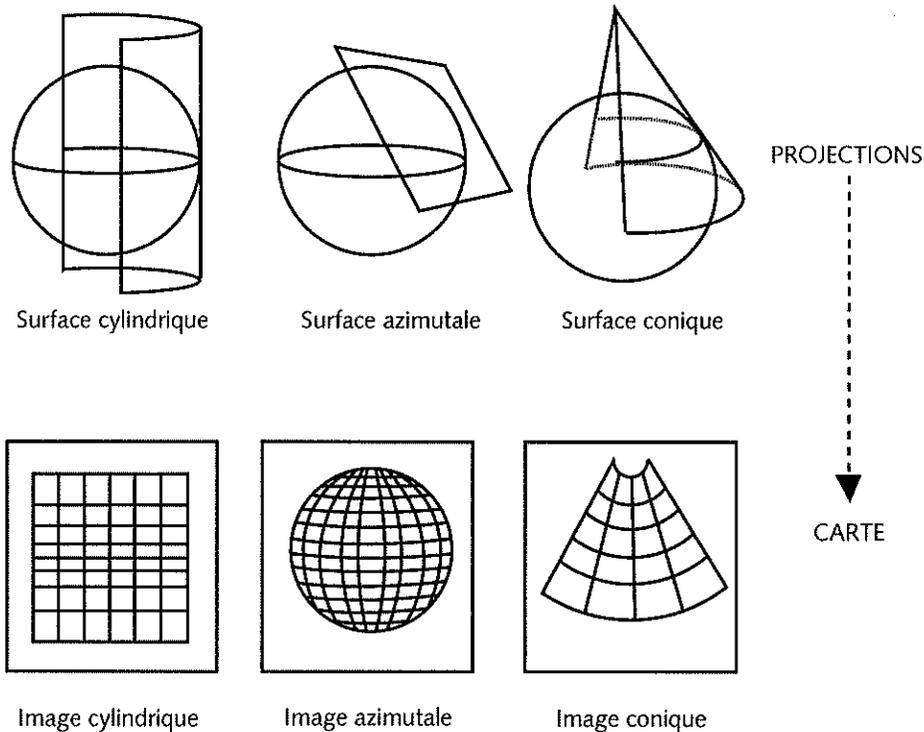


Figure 0.4 : Visualisation de quelques types de projection de la sphère terrestre et de l'image obtenue en carte.

2.3. Comment projeter la surface terrestre ? Quelle projection choisir ?

Une fois la surface de référence choisie, le passage à la carte consiste à représenter une partie de cette surface sur un plan. Ceci implique nécessairement

une nouvelle déformation. En effet un ellipsoïde n'est pas une surface développable. C'est en gros comme si, après avoir pelé une orange, on tentait d'étaler l'ensemble de l'écorce sur un même plan horizontal. On est obligé alors soit de la déchirer, soit d'« étirer » de plus en plus cette écorce en allant vers les pôles.

Différentes représentations ou projections obtenues par le calcul peuvent être utilisées. Chacune d'elles conserve certaines propriétés de la géométrie de la surface de référence mais jamais toutes à la fois. Les principales catégories sont représentées schématiquement sur la figure 0.4.

2.4. Comment obtenir une représentation rigoureuse du monde en satisfaisant aux exigences de la navigation ?

Les exigences de la cartographie en géophysique marine sont en premier lieu de reporter la position du navire (ou des données scientifiques acquises par le navire) par ses coordonnées géographiques. En second lieu, il faut reporter la route du navire (c'est-à-dire l'azimut de la trajectoire suivie par le navire) à cap constant sous la forme d'une droite. On choisit donc les projections conformes (qui conservent les angles), c'est-à-dire les projections où parallèles et méridiens se coupent à angle droit. Ainsi, dans ce type de projection, les routes à cap constant seront représentées par des droites qui recouperont les méridiens avec un angle constant.

La projection la plus couramment utilisée en mer est la projection dite de Mercator directe (figures 0.5 et 0.6). La projection de Mercator s'apparente à la projection cylindrique. La projection cylindrique ne conserve pas les angles : Mercator l'a modifiée en ajustant l'écartement des parallèles de façon à rendre la projection conforme. Le problème consiste donc, après avoir adopté un espacement entre deux méridiens consécutifs correspondant à la différence de longitude, à déterminer l'espacement des parallèles pour que les angles soient conservés (figure 0.5), ce qui entraîne une déformation importante des surfaces (figure 0.6a). Il en découle que l'échelle de la projection n'est pas constante : elle augmente d'un facteur trois pour les latitudes de 0° à 70° et croît très vite ensuite (figure 0.6b). On appelle u la longueur sur la carte représentant une minute de longitude (unité de la carte en millimètres). u est constante, alors que la longueur de la minute de latitude est variable : elle vaut $u / \cos \varphi_m$ (figure 0.7), où φ_m est la latitude locale (ou moyenne quand la projection est peu étendue). À titre d'exemple, on a représenté sur les figures 0.8a et 0.8b la même partie du globe sur deux projections conformes qui sont la projection cylindrique modifiée de Mercator et la projection conique de Lambert. On voit qu'il est avantageux de choisir une projection de type Lambert à l'approche des pôles (au-delà de 60° - 70°) afin d'éviter une trop grande déformation des surfaces.

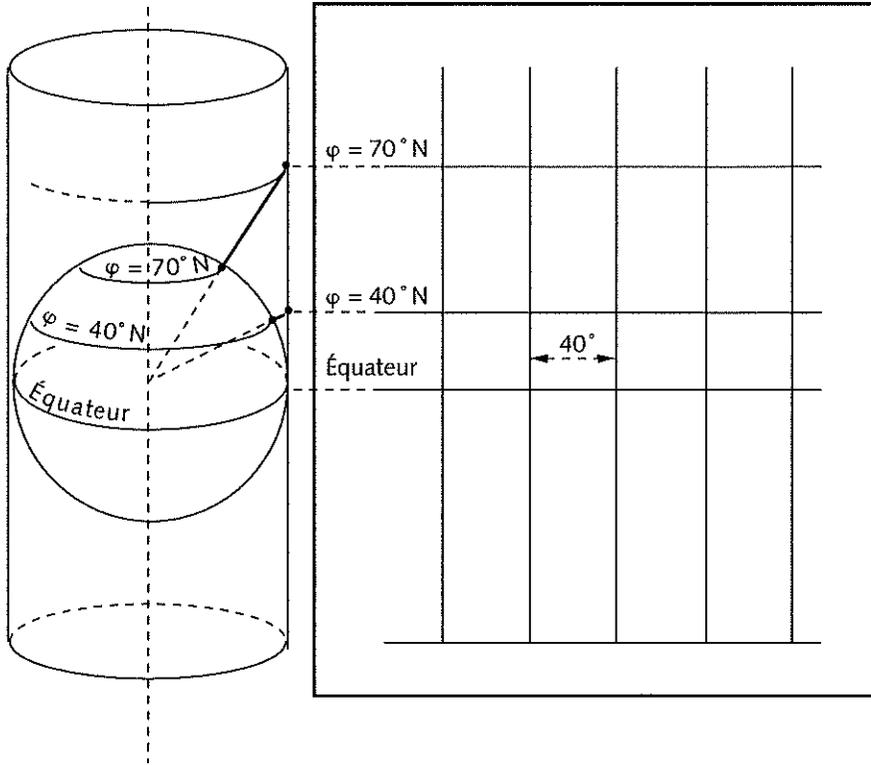


Figure 0.5 : Principe de la projection cylindrique.

La carte de Mercator reste de nos jours la carte marine par excellence car elle permet de représenter sans déformation importante les régions du globe dont la latitude est inférieure à 60° , soit la quasi-totalité des eaux navigables. On utilise aussi couramment les projections coniques conformes de Lambert (figure 0.8b) et la projection UTM (Mercator transverse universelle).

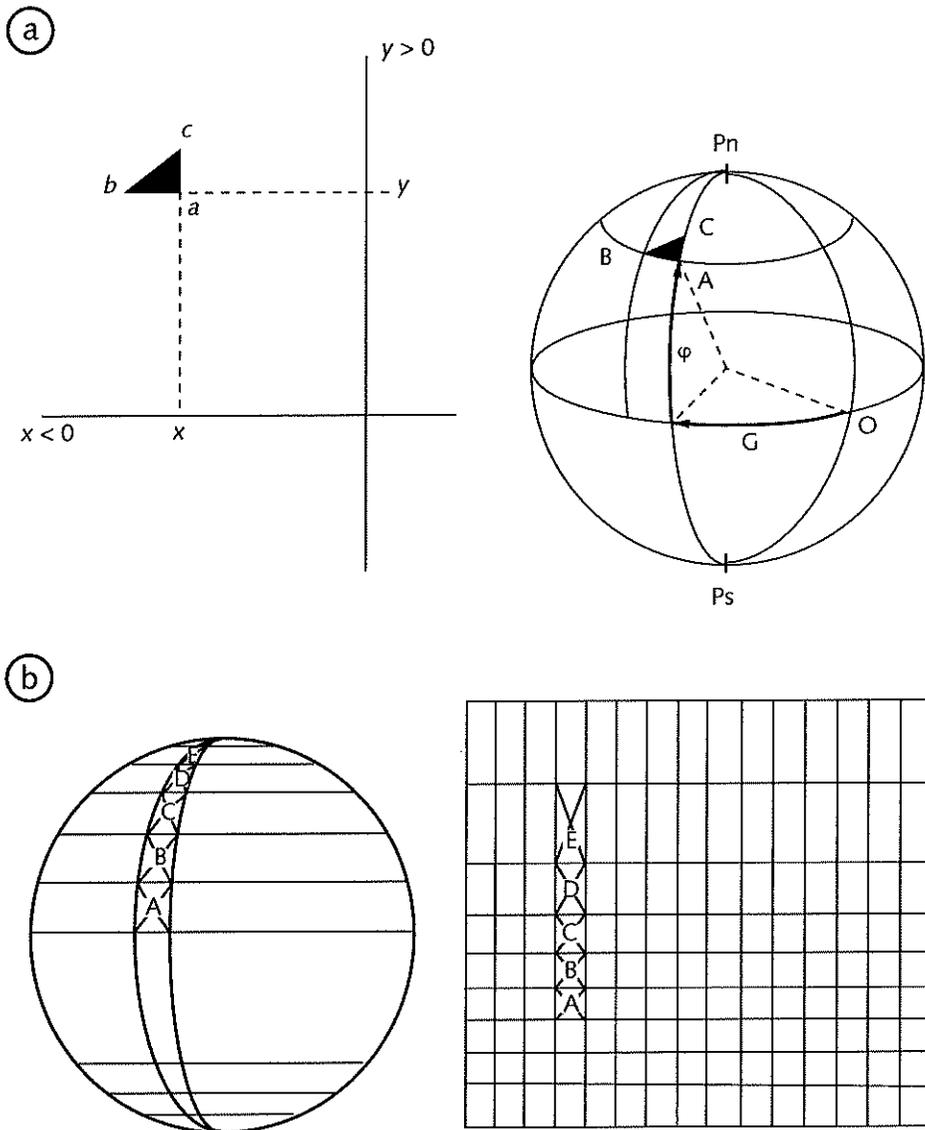


Figure 0.6: La projection de Mercator. a. — Construction de la projection de Mercator. Le triangle ABC sur le globe est choisi assez petit pour être assimilé au triangle abc sur la carte. b. — Déformation des surfaces induite par la projection de Mercator.

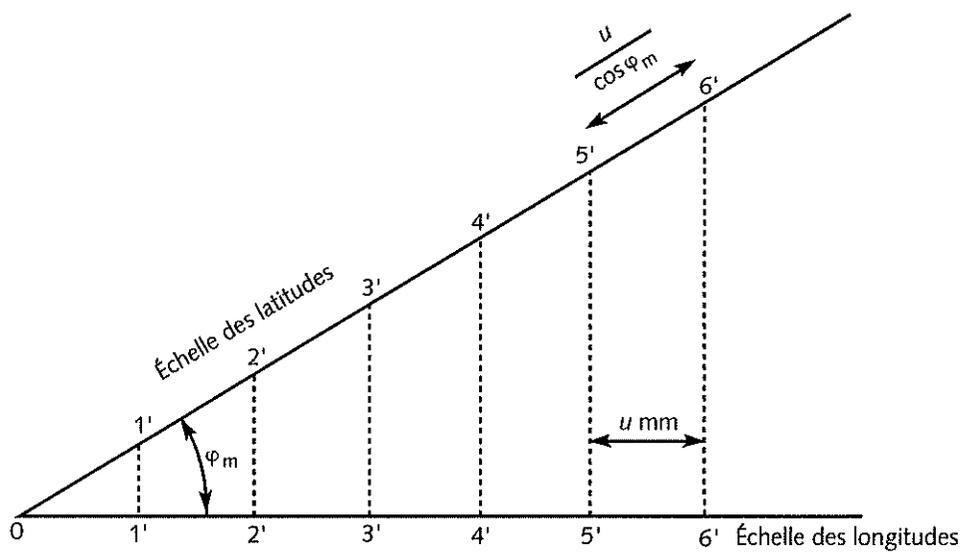


Figure 0.7 : Échelles locales en un point de latitude φ_m .

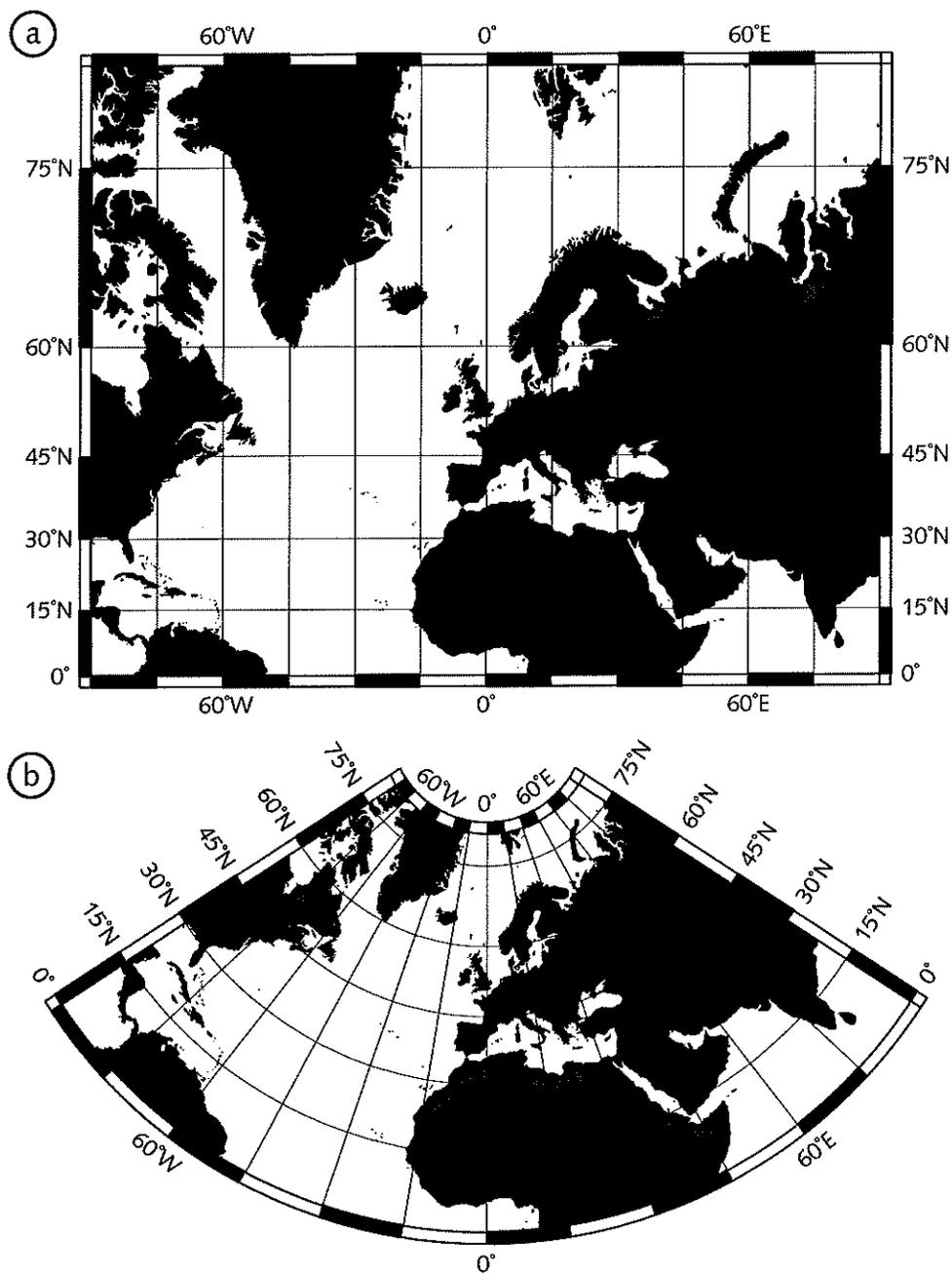


Figure 0.8: Comparaison de deux projections. a. — projection de Mercator; b. — projection conique conforme de Lambert (tangence aux parallèles de 30° N à 35° N).

Chapitre premier

Navigation à l'estime : définition, intérêt, moyens

1. Qu'est-ce que la navigation à l'estime ?

Lorsqu'il n'est pas possible de déterminer la position du navire en utilisant un référentiel extérieur comme des repères terrestres ou un système de radiolocalisation, il faut estimer la position à l'aide des instruments de bord. Il est possible d'estimer la position d'un point par rapport à un autre si l'on est capable d'apprécier la direction suivie par le navire ainsi que la vitesse de celui-ci pendant un temps donné. Ce n'est qu'au XVIII^e siècle que l'accès à une mesure relativement précise et fiable du temps écoulé s'est généralisé sur les navires. Auparavant, cette mesure était peu précise et ne permettait pas de mesurer des temps de parcours brefs.

1.1. Le cap d'un navire est l'angle que fait l'axe du navire avec le nord géographique

En l'absence de dérive, le cap coïncide avec la route suivie par le navire (figure 1.1). La valeur du cap peut se déterminer à partir du nord géographique, comme c'est le cas avec les compas gyroscopiques ou les systèmes de radiolocalisation, du nord magnétique (cas du compas magnétique), ou d'un amer, point remarquable sur la côte (cas du radar par exemple). Les autres angles mesurés près des côtes sont le relèvement (ou azimut, angle entre le nord et l'amer) et le gisement (angle entre l'axe du navire et l'amer). Les valeurs d'angle varient entre 0° et 360°, ce qui évite toute ambiguïté. Le relèvement est alors égal à la somme du cap et du gisement.

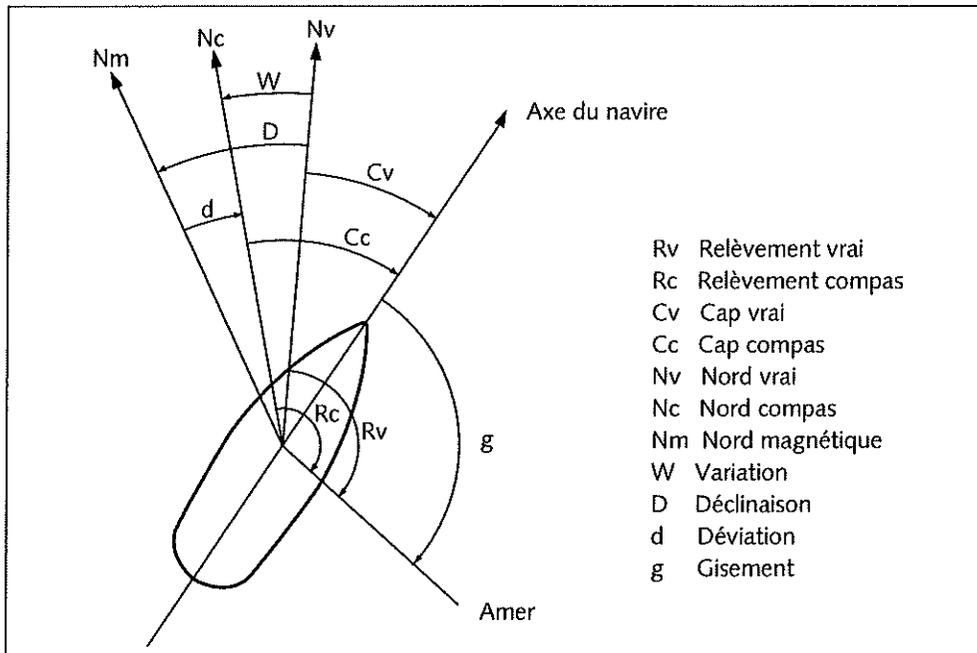


Figure 1.1 : Définition des angles par rapport au navire en navigation.

1.2. La route du navire est l'angle que fait la trajectoire du navire avec le nord géographique

En cas de dérive la route ne coïncide pas avec le cap. Le navire se déplace alors « en crabe » sur la route.

1.3. La vitesse d'un navire est difficile à déterminer

En effet, sans aide extérieure, la plupart des instruments de mesure permettent d'accéder à la vitesse par rapport au plan d'eau sur lequel se déplace le navire (vitesse de surface). Or il est très difficile de tenir compte de façon simple des courants qui déplacent la masse d'eau par rapport au fond, et donc de déterminer la vitesse du navire relativement au fond (vitesse de fond), notamment en raison des variations de la vitesse des courants et des conditions climatiques au cours de longs travaux sur profils, souvent nécessaires en bathymétrie ou en sismique, et qui nécessitent de maintenir un cap et une vitesse constants.

1.4. La dérive d'un navire a deux origines possibles : le vent et les courants

Plus les superstructures d'un navire sont importantes et plus elles donneront prise au vent (on parle de fardage) : le navire dérivera à la surface de la mer. De même un courant marin écartera le navire de la route choisie et le fera dériver avec la masse d'eau qui le porte.

Le navigateur doit donc tenir compte de la dérive due au vent et au courant. Deux choix s'offrent à lui : soit il subit cette dérive et recalcule sa position en tenant compte après coup de la dérive, soit il adapte son cap en anticipant sur la dérive pour maintenir la route choisie au départ. Cela est évidemment bien plus pratique pour aller d'un point à un autre. C'est ce que permet la radionavigation moderne, et qui est la règle générale en géosciences marines où l'on doit très souvent tenir des caps constants pour se rendre à un point donné, ou pour suivre au plus près un profil préétabli. C'est ce qui fait donc toute la difficulté de la navigation sans référentiels extérieurs.

Dans tous les cas, la route est égale à la somme du cap et de la dérive. Dans le cas d'une dérive due au vent, la route surface est égale à la route fond. Dans le cas d'une dérive due au courant, la route fond du navire est la résultante de son déplacement à la surface et du déplacement de la masse d'eau. La route fond est donc différente de la route surface.

2. Pourquoi naviguer à l'estime ?

Il peut paraître superflu aujourd'hui de chercher à connaître précisément le cap et la vitesse estimés, sachant que les référentiels extérieurs fournissent ces mêmes paramètres sur le fond, de manière beaucoup plus précise. Plusieurs arguments peuvent être avancés pour justifier que l'on continue à faire une bonne navigation à l'estime. Le plus important est que les systèmes de positionnement radioélectriques sont toujours susceptibles de fournir des positions dégradées, voir erronées, pendant des durées variant de quelques secondes à quelques heures (voir ch. 2). Il faut se souvenir par exemple qu'au début des années quatre-vingt, avant la mise à disposition du système GPS au domaine civil, le positionnement dans des grands océans n'était possible à 100 m près au mieux que par le système satellitaire TRANSIT, qui pouvait ne plus fournir de données (en raison des orbites existantes) pendant plusieurs heures consécutives ! Il était alors indispensable de pratiquer une navigation à l'estime dans les meilleures conditions possibles, jusqu'à ce qu'un nouveau point satellitaire permette de recalculer la route suivie (ce qui se traduit sur la carte par une route « en baïonnette fictive »). En dépit de la nette amélioration apportée par le système GPS, le problème reste encore réel aujourd'hui, notamment au voisinage

de côtes abruptes où les données GPS « décrochent » en raison de réflexions ou de réfractions parasites. Par ailleurs, même loin des côtes, des dégradations intermittentes de la qualité des points sont fréquentes et nécessitent un nettoyage postérieur des fichiers par élimination des valeurs aberrantes et interpolation linéaire entre les valeurs retenues.

3. Comment naviguer à l'estime ?

3.1. Détermination du cap

L'instrument de bord le plus rudimentaire pour déterminer le cap est le compas magnétique. Il se présente comme une boussole, c'est-à-dire un dispositif composé d'une aiguille aimantée et d'une rose, monté sur un système à la Cardan pour compenser les effets du tangage et du roulis du navire. Le compas magnétique indique le nord, dit « nord compas », c'est-à-dire le nord magnétique (nord géographique corrigé de la déclinaison) affecté de l'effet du champ propre dû au navire appelé déviation (figure 1.1). Ainsi, pour accéder au nord géographique, la mesure doit être corrigée de la déclinaison (mentionnée sur la carte marine) et de la déviation (qui doit être calculée pour chaque navire).

Le compas gyroscopique (figure 1.2) donne directement le nord géographique et permet ainsi de s'affranchir de la déclinaison et de la déviation. Le compas gyroscopique fonctionne selon le principe que tout corps qui tourne sur lui-même tend à maintenir son axe de rotation dans une direction fixe. L'axe de rotation du compas gyroscopique est stabilisé dans la direction du nord géographique. Un système d'amortissement (volant d'inertie) conserve cette direction quels que soient les mouvements du navire.

3.2. Détermination de la vitesse

Rappelons qu'elle se mesure en nœuds (*knots*), un nœud valant un mille marin par heure, soit 1 852 m/h.

– Vitesse « surface » (ou de surface)

Nous ne détaillerons pas les différents outils utilisés pour mesurer la vitesse du navire par rapport à la masse d'eau. Rappelons seulement qu'elle est très importante à déterminer, car elle va conditionner la façon dont vont naviguer à l'arrière du navire les outils géophysiques immergés (flûte sismique, canons, magnétomètre, etc.). Or la profondeur d'immersion de ces instruments doit être très précisément contrôlée pour optimiser la qualité du signal recueilli : dans cette optique, c'est la vitesse de surface (et non sur le fond) qui doit donc être connue.

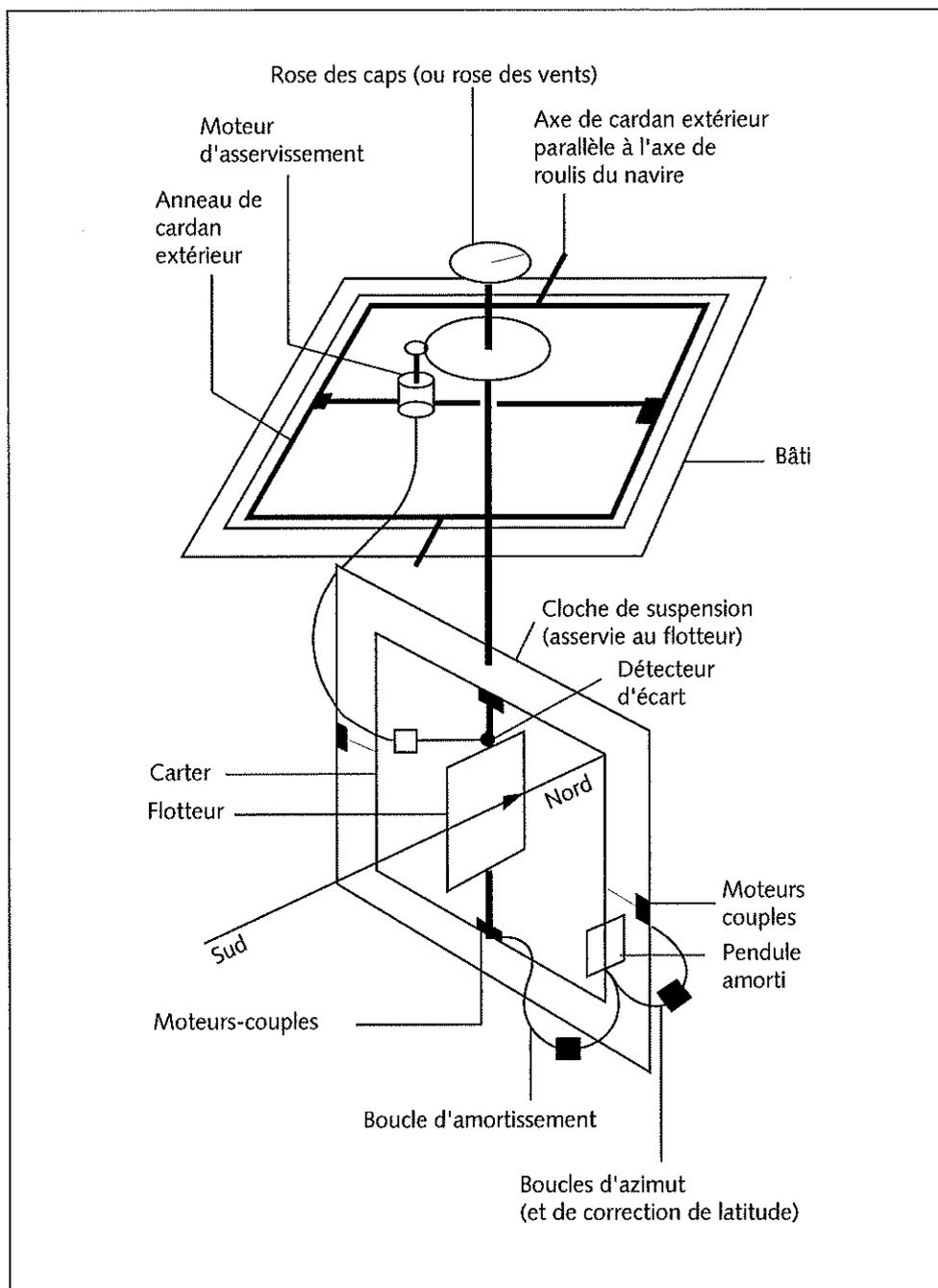


Figure 1.2 : Schéma simplifié d'un gyrocompas.

L'un des moyens les plus rudimentaires pour mesurer la vitesse d'un navire consistait à lancer à la mer une pièce de bois à l'avant du navire afin de mesurer le temps mis par le navire pour la dépasser (figure 1.3a). Ainsi, on mesurait le temps mis par le navire pour parcourir sa propre longueur (connue) et on en déduisait la vitesse.

La plupart des outils de mesure de la vitesse, appelés lochs (loch électromagnétique (figure 1.3b), loch à turbine) permettent de mesurer la vitesse du bateau relativement à la masse d'eau qui entoure le navire. Ils ne permettent pas d'apprécier l'effet des courants et donc le déplacement de la masse d'eau elle-même par rapport au fond. Ainsi la vitesse indiquée par le loch pour un navire se déplaçant dans le sens du courant est inférieure à sa vitesse réelle. À l'inverse elle est supérieure à la vitesse réelle pour un navire se déplaçant à contre-courant. Il est donc nécessaire d'être capable de mesurer très fréquemment la vitesse du navire par rapport au fond.

Signalons encore qu'une façon satisfaisante et pratique de mesurer la vitesse de surface est simplement de compter le nombre de tours par minute du moteur du navire, à partir du moment où un étalonnage préalable a été effectué. La proportionnalité entre vitesse et nombre de tours par minute est établie de manière empirique. C'est une base d'estimation qu'utilisent couramment les commandants des navires.

— Vitesse « fond » (ou « sur le fond »)

La vitesse sur le fond peut être obtenue sans référentiel extérieur par un loch dit « Doppler » par mesure de l'effet Doppler sur une surface réfléchissante située sous le navire, laquelle peut être, selon les circonstances, le toit d'une couche d'eau profonde ou le fond lui-même (figure 1.3c). Par faible fond, cette valeur est très précise. Une valeur de vitesse sur le fond est par ailleurs accessible en toutes circonstances par mesure de l'effet Doppler lié au déplacement des différents satellites du système de positionnement GPS (voir système GPS, ch. 2 § 5).

4. Applications de la navigation estimée

4.1. Loxodromie et orthodromie

Une route orthodromique (figure 1.4a) est une route qui correspond au chemin le plus court entre deux points de la surface de la Terre. Si l'on assimile la Terre à une sphère, c'est donc le plus petit des arcs de cercle qui joint deux points. En navigation il n'est pas facile de suivre une route orthodromique car il faut en permanence modifier sa route. Dans une projection de Mercator,

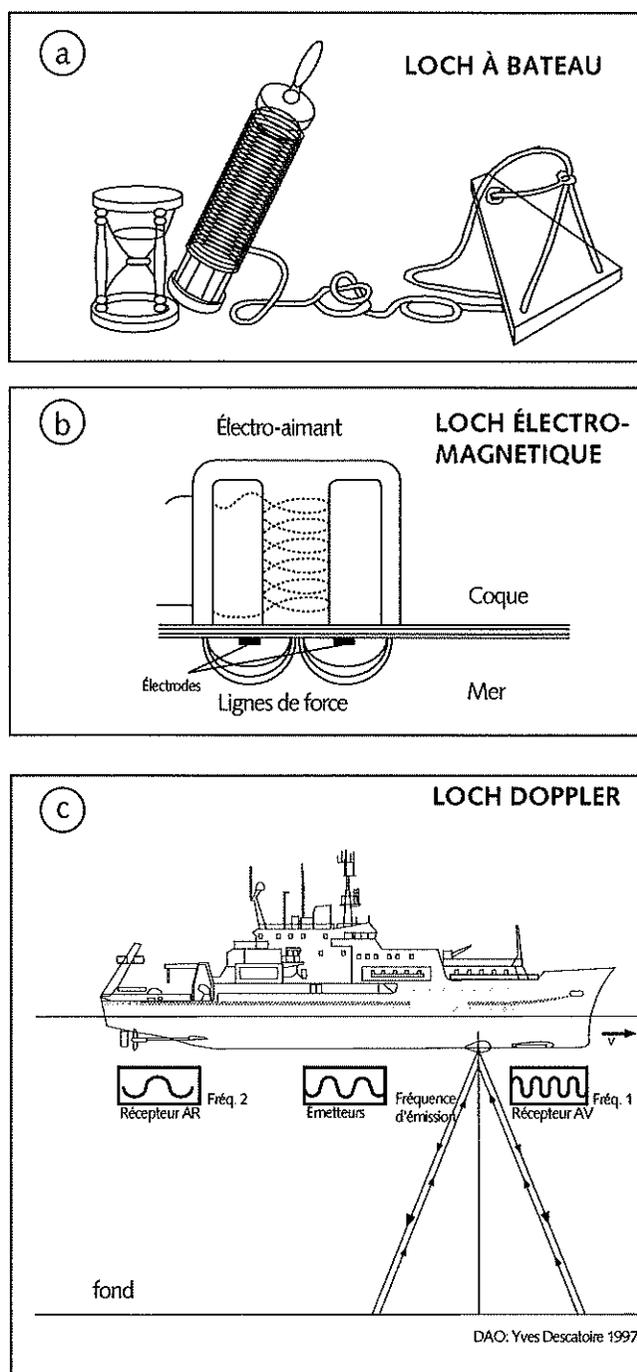


Figure 1.3: Exemples d'instruments servant à estimer la vitesse de surface. a. — loch à bateau ; b. — loch électromagnétique ; c. — loch Doppler.

une route orthodromique sera représentée par une courbe d'allure sinusoidale (figure 1.4a).

Une route loxodromique (figure 1.4b) est une route qui coupe à angle constant les méridiens successifs qu'elle croise. Ainsi, dans une projection de Mercator, une route loxodromique sera représentée par une droite. C'est en général ce type de route que l'on adopte lorsque l'on réalise un plan de position pour une campagne de sismique marine, par exemple, ou de « Sea Beam » (sondeur multifaisceaux en bathymétrie). La loxodromie est comprise entre l'orthodromie et l'équateur.

4.2. Report du point sur la carte

La connaissance du cap et de la vitesse pendant un intervalle de temps donné permet d'estimer la position du navire par rapport au point précédent. Il s'agit donc de reporter sur la carte un angle (cap) et une distance (vitesse multipliée par le temps). Il faut donc disposer d'une règle et d'un rapporteur. Pour un report manuel rapide, on utilise la règle dite de Cras (de l'amiral français Jean Cras) constituée d'un double rapporteur porté par une règle graduée (figure 1.5). Ce report se fait maintenant très souvent de manière automatique sur un écran de contrôle donnant à tout instant la position du navire dans le système de coordonnées géographiques et autorise une vérification continue de l'ajustement entre une route programmée (dans le temps et l'espace) et une route observée en temps réel. Il reste qu'un report sur la carte marine (ou si possible bathymétrique) par compas à pointes sèches et règle Cras à intervalles réguliers se révèle toujours indispensable pour les scientifiques embarqués, notamment quand il s'agit de contrôler précisément la position par rapport à une topographie sous-marine.

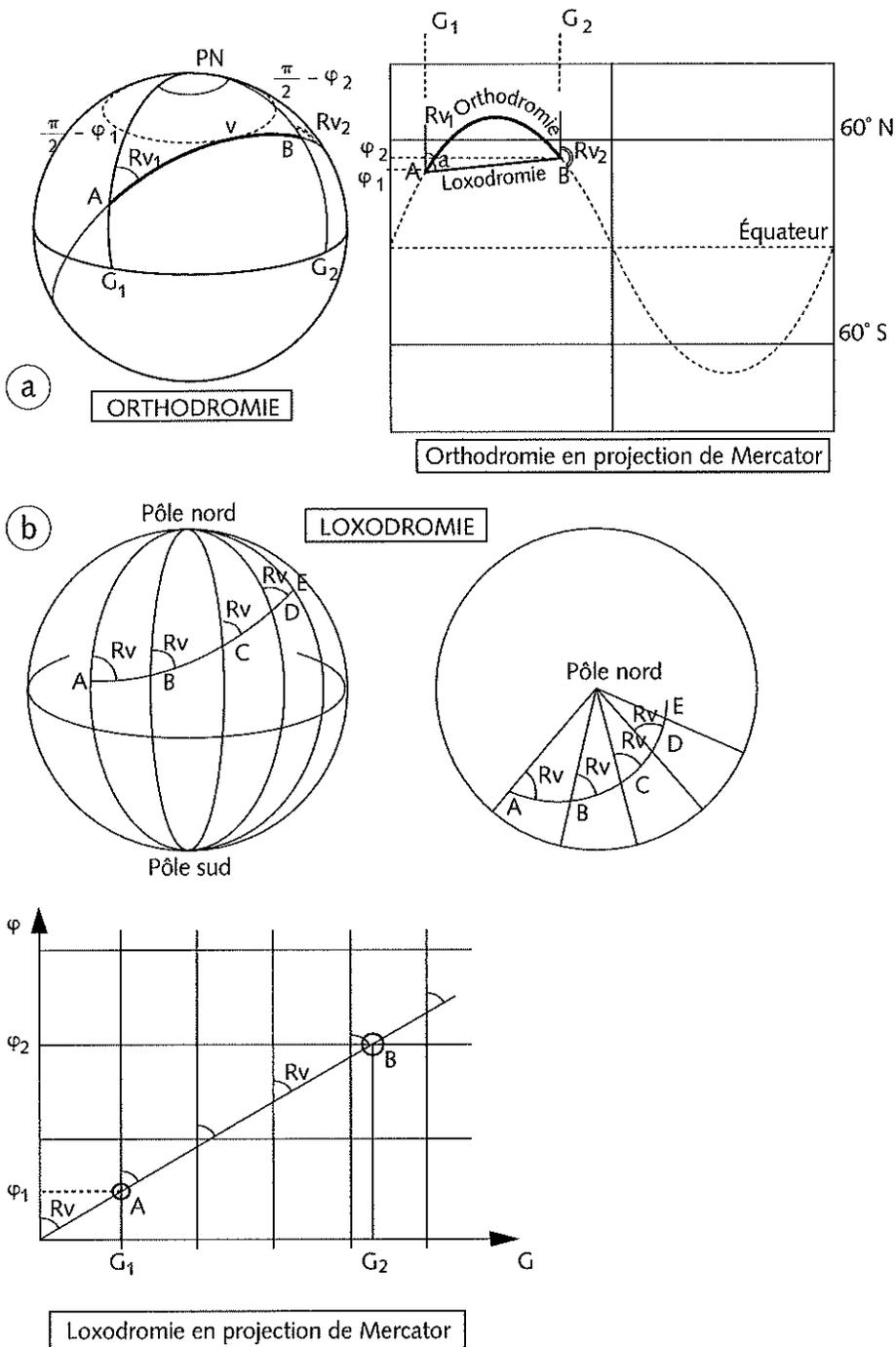


Figure 1.4 : Routes orthodromiques (a) ou loxodromiques (b).

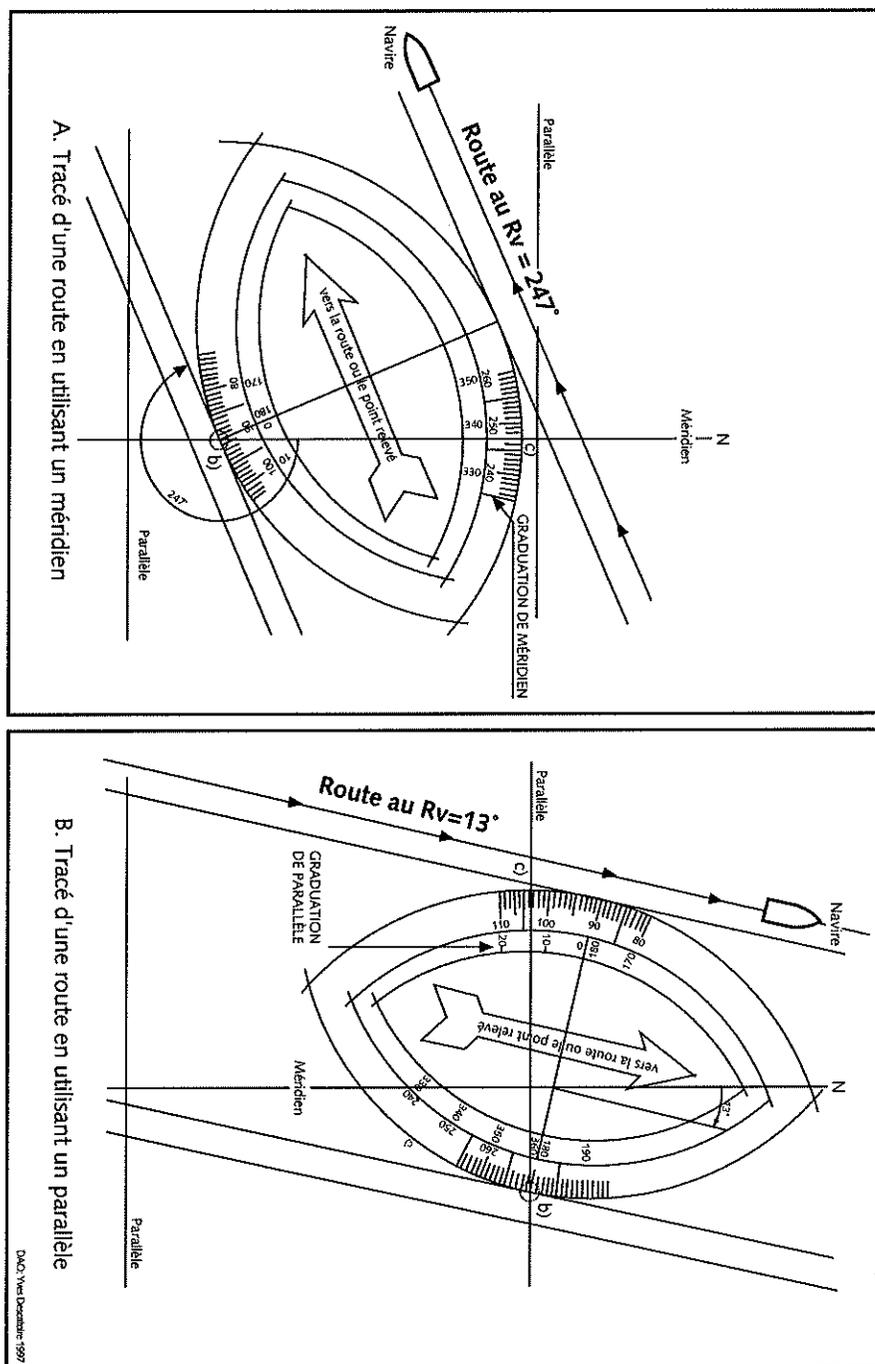


Figure 1.5 : Mesure d'un angle sur la carte (règle Cras).

Navigation par référentiels extérieurs

1. Présentation du problème

Tout navire doit pouvoir, à un moment ou à un autre, se positionner par rapport à un point de référence, ne serait-ce qu'en raison de l'incertitude, croissante avec le temps, qui affecte la position « à l'estime ». C'est alors que la détermination du point et de la route pourra être faite avec une précision suffisante dans le référentiel de projection choisi.

Les premiers points de référence utilisés par l'homme loin des côtes furent bien évidemment les étoiles, qui permirent au xv^e siècle de définir le système de coordonnées astronomiques et autorisèrent les premières traversées de l'océan Atlantique par les mesures au quadrant qui ne donne cependant que la latitude. Pour un véritable positionnement, il manquait à cette époque une connaissance suffisante des dimensions du globe terrestre et, pour déterminer la longitude, la possibilité de mesurer rigoureusement l'écoulement du temps sur de longues périodes. Au xviii^e siècle, les grandes triangulations réalisées par les scientifiques français et l'apparition de chronomètres de précision allaient effectivement permettre d'obtenir ces informations.

Le problème de la navigation, autrefois comme aujourd'hui, est qu'il faut pouvoir déterminer une position en des laps de temps très courts, puisque le mobile se déplace, et avec une précision suffisante pour déduire une vitesse de plusieurs positions successives. En géosciences marines, la plupart des travaux (profils, prélèvements, etc.) nécessitent un positionnement avec une précision

de quelques dizaines de mètres dans un référentiel donné. Un tel positionnement dans les grands océans du globe n'a pu être possible qu'avec l'avènement de la « radiolocalisation », qui consiste à déterminer la position d'un navire à un instant donné par des moyens radioélectriques. La radionavigation consistera, par les mêmes moyens, à guider et à contrôler la route du navire du point de départ au point d'arrivée.

2. Précision requise des systèmes utilisés

En fonction des sources d'erreurs déjà évoquées dans la première partie (approximations dans le report sur une carte d'un point observé, et dans la définition du point dans le cadre d'un référentiel choisi, l'ellipsoïde, qui ne peut être confondu avec le géoïde), il résulte qu'une différence persistera toujours entre le lieu fourni par n'importe quel système de positionnement, et la position géodésique, donc réelle, de ce lieu.

— *La justesse* (ou prédictibilité) de la position obtenue qualifie l'écart à une position quasi « absolue » — c'est-à-dire par rapport à un référentiel terrestre choisi — indépendamment du système de positionnement. Elle dépend de la connaissance du référentiel, de la fidélité du système de positionnement et des anomalies de propagation des ondes en un lieu donné.

— *La fidélité* (ou répétabilité) d'un système de positionnement radioélectrique qualifie sa capacité à permettre le retour à un point précédemment localisé dans ce même système. Elle dépend surtout de la sensibilité et de la fidélité du récepteur ainsi que de la constance des lois de propagation.

— *L'erreur* représente la différence entre la position mesurée et celle fournie par un système de positionnement juste. Elle peut être systématique, se répétant en un lieu donné, à un moment donné, ou avec un matériel déterminé et influe sur la justesse. Elle peut être accidentelle à cause de l'instabilité des récepteurs, des conditions atmosphériques, de la réfraction côtière, des effets de relief, des erreurs de nuit et influe sur la fidélité. Dans le cas des relèvements radiogonométriques (mesure de l'angle entre le méridien du lieu et le grand cercle passant entre le lieu et la station radiogonométrique fixe), une autre erreur s'ajoute, appelée erreur de convergence, qui vient du fait que les ondes radioélectriques de nombreux systèmes terrestres se propagent au plus court le long de la surface de la terre, donc suivant l'orthodromie. Il en résulte que lors du report sur la carte en projection de Mercator, une correction entre la loxodromie et l'orthodromie, appelée correction Givry, doit être calculée. Cette erreur reste le plus souvent inférieure à celles liées aux irrégularités de propagation ou à l'instrument. L'erreur totale varie entre 1° et 4° d'azimut.

Nous allons maintenant rappeler rapidement le principe des mesures astronomiques et les types et caractéristiques de propagation des ondes électromagnétiques utilisées en radionavigation. Nous présenterons ensuite les principaux systèmes de radiolocalisation utilisés aujourd'hui, par ordre d'importance, en insistant sur leurs conditions d'utilisation et les précisions qu'ils autorisent.

3. Navigation astronomique

Le principe de la navigation astronomique repose sur la mesure de la hauteur d'un astre sur l'horizon (figure 2.1). Si un navigateur observe que la direction de visée d'un astre fait un angle $h\nu$ avec l'horizontale, il sait qu'il se trouve alors sur le petit cercle de rayon angulaire ($90^\circ - h\nu$) centré sur le point substellaire, intersection de la sphère terrestre avec la verticale qui joint l'astre au centre de la Terre (figures 2.1c et 2.1d) pour une Terre sphérique. Ce petit cercle est appelé cercle des hauteurs (par exemple, si trois personnes disposées sur un même cercle centré sur un lampadaire regardent celui-ci, elles le verront à la même hauteur).

Pour mesurer la hauteur d'un astre par rapport à l'horizon, on utilise le sextant (figure 2.1a). Le principe de cet appareil repose sur la double réflexion (grand miroir et petit miroir), ce qui permet de superposer la ligne d'horizon par visée directe avec l'image de l'astre obtenue par double réflexion sur les miroirs m et M . On lit alors la hauteur de l'astre sur le limbe.

Si l'on se positionne par rapport à un seul astre (le Soleil par exemple) cela suppose de réaliser deux observations non simultanées (le matin et à midi) et ensuite de reporter son lieu de position, à condition de pouvoir mesurer l'écoulement du temps sur de longues périodes. Les premiers chronomètres de précision furent expérimentés lors des expéditions de James Cook au XVIII^e siècle. Le meilleur point astronomique est obtenu par l'observation de trois hauteurs d'étoiles (ou trois planètes) différentes (a_1, a_2, a_3) dans un intervalle de temps aussi court que possible. L'observation se fait au crépuscule et à l'aube, moments de la journée où l'horizon est bien discernable. La précision est alors de l'ordre du mille. Le point est donné par l'intersection des trois cercles de hauteur (figure 2.1b).

Entre les points astronomiques, la navigation se fait à l'estime. Il était courant, avant la généralisation des systèmes de positionnement par radiolocalisation, qu'en cas de mauvais temps (ciel nuageux) la navigation se fasse à l'estime pendant plusieurs jours.

Remarquons enfin que la précision d'un point au sextant (environ un mille)

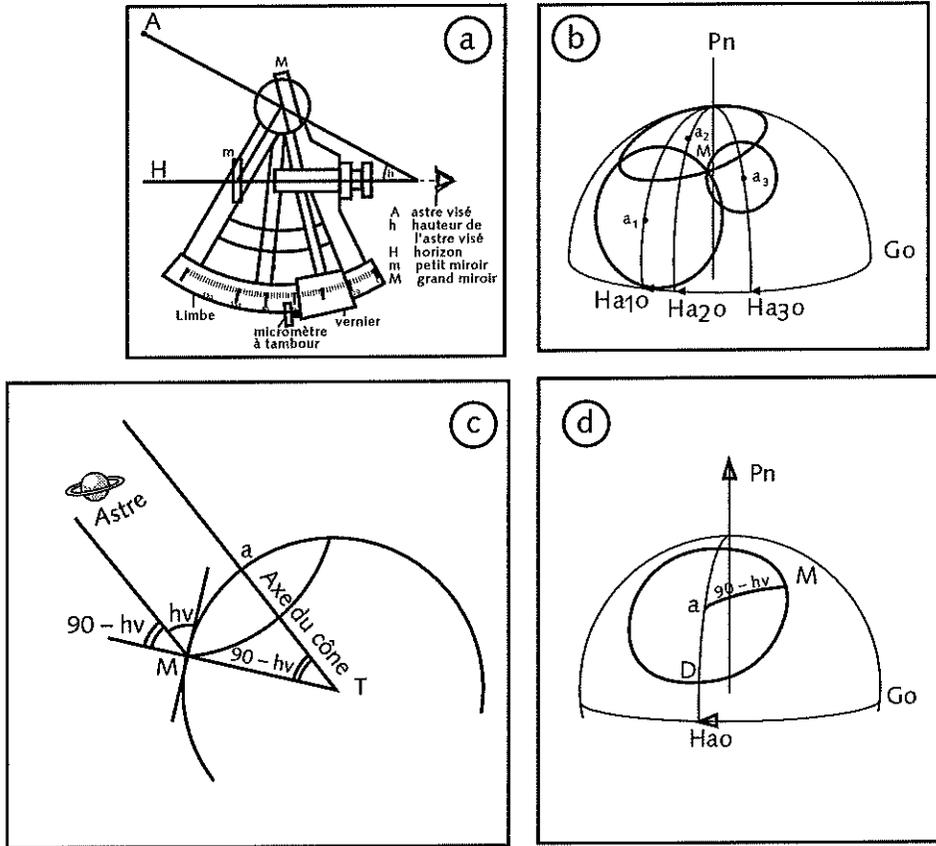


Figure 2.1 : Principe de la navigation astronomique (voir texte).

dépend beaucoup de l'état de la mer : si le navire est affecté par la houle, la mesure de l'angle est moins précise.

4. Propagation des ondes électromagnétiques

Le choix des modes de propagation utilisés dans les systèmes de radiolocalisation est fonction des portées souhaitées (figure 2.2). Ils dépendent beaucoup de l'environnement, qui agit de différentes façons :

– À la surface du globe, c'est sur les continents que la propagation (des basses fréquences notamment) sera perturbée, en raison des propriétés et des caractéristiques variables du sol, alors que la surface de la mer assure une propagation bien meilleure. Il convient donc de tenir compte de perturbations

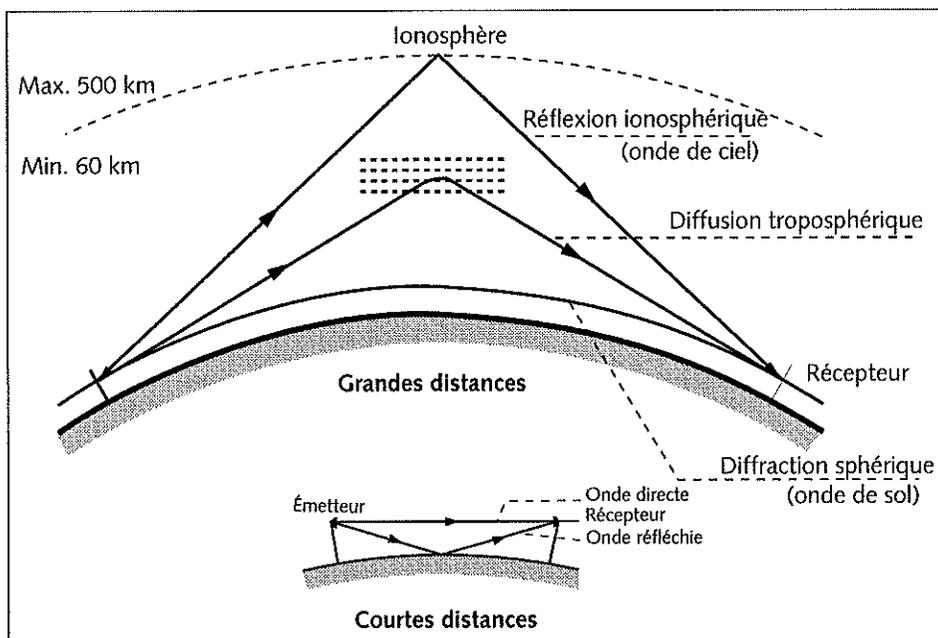


Figure 2.2 : Principaux trajets suivis par les ondes électromagnétiques utilisées en radiocalisation.

très fréquentes près des côtes, notamment lorsqu'elles sont très escarpées. Elles affecteront tous les systèmes.

— Les basses couches de l'atmosphère (la troposphère, épaisse de 9 kilomètres au pôle et de 17 kilomètres à l'équateur ; la stratosphère, épaisse de 30 kilomètres) sont des milieux très favorables, par leurs propriétés diélectriques, à la propagation des ondes utiles en radionavigation. Outre l'onde directe et l'onde réfléchie au sol, une onde diffusée dans la troposphère peut également s'y propager (figure 2.2).

— Enfin l'ionosphère assure, à des altitudes variant entre 60 et 500 kilomètres, une réflexion efficace des ondes de moyenne et basse fréquences (MF, LF), mais la précision de la position obtenue par cette onde est limitée en raison des modifications nombreuses — dépendant de l'éclairement solaire — de la composition de l'ionosphère. Cependant, les ondes de très basses fréquences (VLF) bénéficient d'une propagation par « guide d'onde » qui permet une conservation de l'énergie sur des grandes distances, à une vitesse de groupe supérieure à $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Les principales ondes utiles et leurs caractéristiques sont présentées en fonction de leur fréquence dans le tableau suivant :

Fréquence	Longueur d'onde	Bande	Ondes prépondérantes	Caractéristiques	Principaux systèmes
300 GHz à 300 MHz	1 mm à 1 m	EHF à VHF	<ul style="list-style-type: none"> • Directe • Diffusion troposphérique 	<ul style="list-style-type: none"> — Très bonne directivité — Réflexions sur obstacles 	Satellites (GPS, <i>Transit</i> , <i>Syledis</i>)
30 MHz à 2 MHz	10 m à ~150 m	HF	<ul style="list-style-type: none"> • Ionosphérique (onde de ciel) 	<ul style="list-style-type: none"> — Portée mondiale sans interférences — Excellent rendement en moyenne portée 	Radiocommunications maritimes
2 MHz à 30 kHz	~150 m à 10 km	MF à LF	<ul style="list-style-type: none"> • Ionosphérique • De surface (onde de sol) 	— Onde ionosphérique absorbée de jour	Toran
				— Parasites atmosphériques devenant importants vers les LF.	Loran C Decca
30 kHz à 3 kHz	10 km à 100 km	VLF	<ul style="list-style-type: none"> • De surface • Ionosphère (guide d'onde) 	<ul style="list-style-type: none"> — Onde ionosphérique prédomine à grande distance — Brutale variation de l'absorption au coucher du soleil — Parasitages atmosphériques importants — Pénétration dans l'eau de mer 	Omega

Les systèmes de radiolocalisation peuvent être brièvement présentés en fonction de trois critères principaux :

A. Implantation : à base spatiale (satellites) ou à base terrestre (stations ou balises sur des points géodésiques) ;

B. Portée :

- Base spatiale : il n'y a pas de limite de portée, mais la nécessité pour le satellite et le récepteur d'être en visée directe, ce qui déterminera des périodes de localisation plus ou moins favorables.
- Base terrestre :
 - Courte portée (moins de quelques centaines de kilomètres), assurée par l'onde directe pour les fréquences UHF et VHF (figure 2.2; tableau).
 - Moyenne portée (de 200 km à 600 km), assurée par l'onde de sol pour des fréquences proches de 2 MHz. La portée diminue la nuit en raison d'interférences entre l'onde de surface (sol) et l'onde « de ciel » (ionosphérique).
 - Longue portée (au-delà de 600 km), assurée par les ondes de surface et de ciel, pour des fréquences variant entre quelques dizaines et quelques centaines de kilohertz.

C. Technique de mesure :

- mode de localisation : directionnel (mesure de la direction des émetteurs), circulaire (mesure du temps de trajet entre un émetteur et un récepteur : cela suppose de bien connaître l'instant d'émission), ou hyperbolique (différence de temps qui sépare la réception de deux signaux émis simultanément par deux émetteurs) ;
- type de mesure : impulsions, comparaison de phases, effet Doppler ;
- type d'émission : continue, à impulsion ;
- synchronisation : horloges atomiques, stations maître et esclaves, station de référence ;
- fréquence et puissance d'émission.

5. Le système GPS : une révolution dans le positionnement en mer

Développé et testé entre 1979 et 1986 par le département de la Défense des États-Unis, mis en service opérationnel entre 1986 et 1993, le système de positionnement planétaire (*Global Positioning System*, GPS), appelé parfois NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite Timing and Ranging*), offre aujourd'hui à tout navigateur une qualité de positionnement jusqu'alors inégalée. Il est devenu dès 1986 le système de positionnement le plus utile pour la navigation civile et militaire, quel que soit l'océan, et tend à devenir le système universel de navigation. Ses domaines d'application sont innombrables, depuis le positionnement en vol des avions jusqu'à la mesure à quelques millimètres près des mouvements tectoniques à la surface de la Terre. Chaque année voit s'accroître les performances et donc les potentialités du GPS.

Après une évocation du principe de la mesure en GPS, nous donnerons une description du système de positionnement, puis nous indiquerons comment sont exploités les signaux des satellites, et quelles précisions de positionnement en découlent dans différents contextes.

5.1. Principe de la mesure GPS

Pour fournir une localisation, le système GPS assure une mesure directe (en visée) des distances (allers simples) qui séparent des émetteurs (les satellites défilants, aux déplacements très bien connus) à un récepteur, porté par le mobile qui nous intéresse (le navire). En ce qui concerne la navigation, le GPS fournit une estimation de la vitesse du récepteur mobile par une mesure de l'effet Doppler qui affecte les signaux reçus des satellites.

Les satellites sont situés à une altitude de 20 000 km environ, sur des orbites bien définies. Les distances sont estimées en comparant les échelles de temps fournies d'une part par les horloges des satellites et d'autre part par l'horloge du récepteur. Chaque signal sinusoïdal émis par chaque satellite transporte deux signaux modulateurs : l'un, rapide, à haute fréquence, permet la mesure de la distance du satellite au récepteur est appelé signal de code ; l'autre, lent, à basse fréquence, transporte le message du satellite, qui informe sur sa position exacte dans l'espace (éphémérides) et son état de santé.

5.2. Description sommaire du système GPS

Le système GPS fonctionne au moyen de trois maillons indispensables : les satellites, qui constituent le segment espace, le segment de contrôle et de commande et le récepteur, ou segment utilisateur.

5.2.1. Les satellites

Un positionnement correct n'est généralement possible que si au moins quatre satellites sont visibles à une hauteur sur l'horizon supérieure à 10° (voir ch. 2 § 5.3). On peut calculer que la constellation constituée de 21 satellites répartis sur 6 orbites circulaires espacées de 60° de longitude (figure 2.3), à l'altitude de 20 183 km, d'inclinaison 55° et de période 11 h 58 min, assure une couverture mondiale.

Les satellites GPS ont une durée de vie limitée à sept ou huit ans. C'est pourquoi la constellation est en constante évolution : entre 1978 et 1985, 11 prototypes ont été lancés (tranche ou *block* 1), dont 6 restaient opérationnels à la fin 1992 ; 17 nouveaux satellites ont suivi entre 1989 et 1992 (tranche ou *block* 2), encore tous opérationnels à cette même date. En 1995, environ 30 satellites étaient disponibles, y compris les satellites prototypes. On peut donc considérer que depuis 1993, un bon positionnement à 3 dimensions est

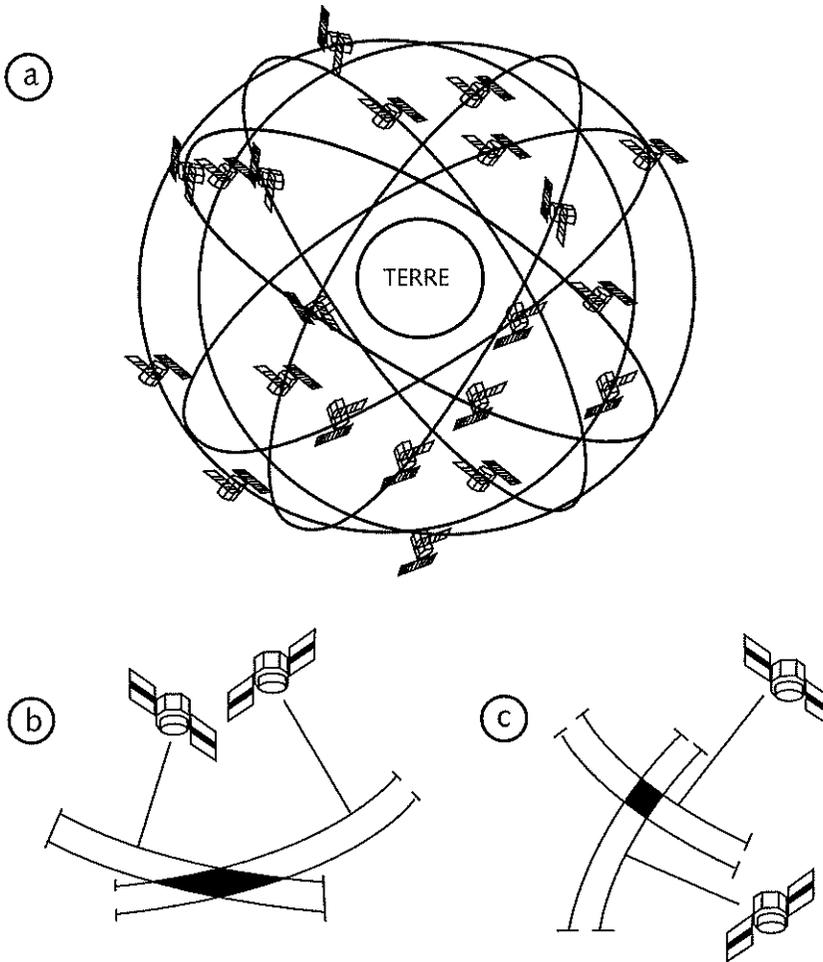


Figure 2.3 : Positions des satellites GPS.

a. — Constellation de satellites. b et c. — Zone d'incertitude en fonction de la configuration de deux satellites vus depuis le récepteur. La mesure sera plus précise en c qu'en b.

possible en tout point du globe et pratiquement en continu, avec une précision variable en fonction des conditions que nous allons décrire.

Les satellites sont placés sur une orbite précise, soigneusement ajustée grâce à un système de propulsion propre. L'énergie est renouvelée par des panneaux solaires. Le satellite est muni de quatre horloges atomiques de haute précision (stabilité de fréquence de 10^{13} /jour) qui permettent d'élaborer deux fréquences, les porteuses ($L_1 = 1\,575,42$ MHz, et $L_2 = 1\,227,60$ MHz). Elles sont

modulées en phase par un ou deux codes dits pseudo-aléatoires (C/A et P, les signaux de code : C/A module L_1 , P module L_1 et L_2) et par un code navigation (message du satellite). La raison principale qui justifie l'emploi de deux fréquences est la nécessité d'apporter une correction correspondant au retard que subit le signal lors de son passage dans l'ionosphère.

On parle de code pseudo-aléatoire car le signal a une structure complexe qui assure une reconnaissance univoque des informations de temps (figure 2.4). Le code pseudo-aléatoire C/A (*Coarse Acquisition*, d'une période d'une milliseconde) sert, en monofréquence, au service de positionnement dit « standard » (service « SPS »), utilisable à des fins civiles, qui fournit une précision horizontale moyenne de l'ordre de 100 mètres (voir ch. 2 § 5.3.3). Depuis quelques années, l'utilisation du code P (*Precise*) est également possible pour certains utilisateurs dans certaines conditions et permet en bifrèquence d'avoir en temps réel l'accès à un service de positionnement précis (service « PPS »), de l'ordre de 20 mètres en position absolue (voir ch. 2 § 5.3.3). Un code protégé (Y, classifié) n'est accessible qu'aux forces armées américaines.

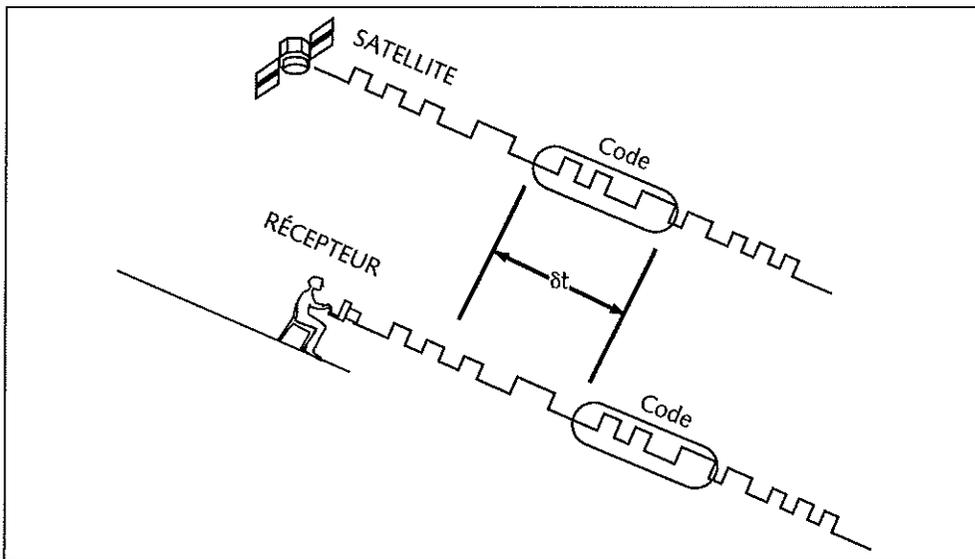


Figure 2.4 : Représentation des codes pseudo-aléatoires émis par un satellite et un récepteur. δt est le décalage entre les deux codes.

5.2.2. Le réseau de contrôle et de commande

Il est constitué de cinq stations de poursuite automatique (MS), d'une station de contrôle maîtresse (MCS), et de trois stations de transmission automatique.

Les stations MS enregistrent les signaux émis par les satellites ; à partir de ces données, la station MCS assure un contrôle permanent des éphémérides et des horloges et permet un calcul précis de l'ajustement des orbites et des horloges au temps GPS. Elle valide et met à jour ces données, qui sont ensuite transmises aux satellites par les trois stations de transmission. Ceci permet aux satellites de diffuser un message dit « navigation » le plus exact possible aux récepteurs.

5.2.3. Les récepteurs

Ils ont pour fonction d'assurer l'identification et la sélection des satellites, de comparer leur propre code pseudo-aléatoire à ceux qui proviennent des différents satellites sélectionnés, afin d'estimer les différences de temps de propagation et les effets Doppler ; de décoder et d'intégrer les messages de navigation ; d'en déduire les éléments de position (coordonnées instantanées en trois dimensions, vitesse du mobile, erreur d'horloge).

En mer, la plupart des récepteurs couramment utilisés sont de type mono-fréquence car ils suffisent pour obtenir le degré de précision souhaité, soit de l'ordre de la dizaine de mètres en général. Les récepteurs bifréquence sont très fréquemment utilisés à terre, par exemple en géodésie. On trouve dans le commerce, trois grandes catégories de récepteurs :

- Un récepteur à un canal, qui inclut un générateur de code, un corrélateur et un détecteur, et traite le signal d'un seul satellite à la fois. Une unité de calcul permet simultanément d'estimer les distances et d'utiliser les messages.

- Un récepteur à N canaux et N voies, qui assure en parallèle les mêmes fonctions en poursuivant simultanément N satellites. Il permet de poursuivre les signaux à des vitesses supérieures à 1 000 nœuds. Il est donc très utile en aviation, mais coûteux.

- Un récepteur à N canaux et L voies ($L > N$), qui doit multiplexer les signaux reçus afin qu'un canal serve successivement à mesurer des données provenant de L satellites. Un premier canal sert à effectuer les mesures de distance ; un autre sert à acquérir les messages, afin de permettre de renouveler plus vite la position estimée. Cela permet d'entretenir (de rafraîchir) le point de façon quasi permanente et de réactualiser les messages toutes les deux à trois minutes. Les récepteurs à multiplexage rapide permettent de mesurer les distances aux satellites utilisés en moins de 20 millisecondes, période pendant laquelle l'information de message est stable. Par exemple, il est possible d'avoir une période de multiplexage de 1 ms, et donc de mesurer cinq distances en 5 ms, soit quatre lots de mesures stables pour chaque satellite dont on pourra aussi lire simultanément les messages.

5.3. Le traitement de base des signaux GPS

5.3.1. Lois élémentaires d'exploitation

La base de la détermination est l'estimation de plusieurs pseudo-distances entre le récepteur mobile et les satellites à un instant donné. On parle de pseudo-distances car ces valeurs sont déduites du retard entre le signal reçu des satellites et celui, identique, qui est produit par le récepteur dans son échelle de temps interne (figure 2.4). Or l'erreur d'horloge du récepteur est importante (pour des questions de coût, sa stabilité est bien inférieure à celles des horloges satellitaires), si bien qu'il est nécessaire de calculer une correction d'horloge pour tenir compte de ce biais. C'est pourquoi la pseudo-distance diffère de la distance réelle (une autre cause d'erreur, moins importante, est liée aux retards de propagation dans l'ionosphère). La position en trois dimensions est obtenue par mesure des pseudo-distances à quatre satellites : l'écart entre l'heure du satellite (base de temps GPS) et l'heure du récepteur (temps de l'horloge interne) peut alors être calculé : les horloges peuvent être synchronisées, les pseudo-distances corrigées, et le point localisé à l'intersection des quatre sphères de distance.

Enfin les signaux reçus sont affectés d'un effet Doppler puisque le récepteur et les satellites se déplacent. Connaissant avec une grande précision les éphémérides, la fréquence des signaux émis et reçus et la désynchronisation des signaux, il est possible de faire une mesure de l'effet Doppler sur les fréquences porteuses reçues des satellites et d'en déduire une mesure de la vitesse du navire. Les trois opérations (mesure des pseudo-distances, estimation des distances par correction du biais d'horloge et mesure Doppler sur les porteuses) peuvent se faire indépendamment ou de manière combinée.

5.3.2. Modes d'exploitation

— Le mode normal (3D + T)

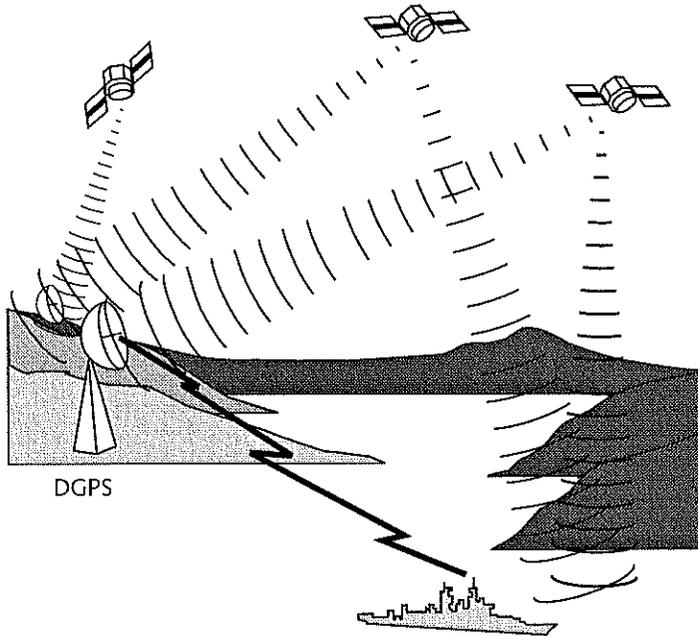
C'est le plus fréquemment utilisé. Il consiste à corrélérer le code (C/A ou P) reçu de quatre satellites au moins et un code identique produit par le récepteur. Il permet d'obtenir la position en 3 dimensions (3D), ainsi que le biais de l'horloge, donc le temps absolu (T). La fréquence de la porteuse observée (L_1 et/ou L_2) est reconstituée par démodulation du code P : le récepteur peut donc mesurer l'effet Doppler sur cette porteuse et calculer aussi la vitesse du navire.

— Modes dégradés

En mer, pour des précisions ordinaires, on peut considérer l'altitude connue. Trois mesures de pseudo-distances sont par conséquent suffisantes pour déterminer la latitude, la longitude et le temps (mode 2D + T). Dans le cas où l'on dispose d'une horloge de haute précision, on peut voir la position avec trois satellites à terre (mode 3D), ou même deux en mer (mode 2D).

— Mode différentiel (DGPS, figure 2.5)

Il consiste à prendre en compte les erreurs mesurées sur les pseudo-distances à une station fixe à terre : ces informations sont transmises par voie radioélectrique au récepteur mobile, qui peut ainsi améliorer le calcul de sa position, et ceci jusqu'à quelques centaines de kilomètres de la station fixe.



DAO: Yves Descatoire 1997

Figure 2.5 : Principe de relai des signaux par une station terrestre GPS (GPS différentiel = DGPS).

5.3.3. Performances et précision

Il faut rappeler que le système GPS est contrôlé par le département de la Défense des États-Unis : pour cette raison, l'accès aux services standard (SPS) et précis (PPS) est limité par deux dispositifs :

- SA (*Selective Availability*), qui réduit la précision des éphémérides et bruite le signal de l'horloge des satellites ;
- AS (*Anti-Spoofing*), qui surcode le code P en code Y protégé.

Ces procédés sont mis en application de façon variable dans le temps, en fonction des conditions politico-militaires (par exemple le dispositif SA a été renforcé pendant la guerre du Golfe). En 1995, l'accès au service PPS sans SA et sans AS (donc code P) était possible pour un récepteur bifréquence.

La couverture spatiale offerte par le système GPS est continue et mondiale, mais il faut savoir que des dégradations géométriques sont possibles dans certaines zones et à certains moments de la journée. À la fin de 1993, la probabilité d'observer correctement simultanément quatre satellites en tout point de la surface terrestre était de 95 % sur un an, pourcentage qui n'a pu que s'améliorer avec plus de trente satellites fonctionnels en 1995.

Finalement, la précision de positionnement et de vitesse fournie par le système GPS dépendra essentiellement de deux facteurs : les erreurs de mesure des distances satellites-récepteur (figure 2.4) et la configuration des satellites vus depuis le récepteur au moment de la mesure (figures 2.3b et 2.3c). La qualité de cette configuration est donnée par un facteur, le PDOP (facteur de dégradation géométrique de la précision), dont la valeur varie généralement de 1 à 6 (1 : très bonne précision ; 3 : précision moyenne ; 6 : mauvaise précision). Pour un PDOP de 3, on peut donner les précisions absolues (en temps réel) :

- service SPS avec SA : 100 m (horizontal), 170 m (vertical) ;
 - service SPS sans SA : 30 m (horizontal), 50 m (vertical) ;
 - service PPS : 20 m (horizontal), 30 m (vertical) ;
 - GPS différentiel (à 50 km) : 10 m-20 m (horizontal), 30 m-80 m (vertical).
- La précision sur la vitesse est de l'ordre de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ à $0,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Ces précisions sont évidemment bien inférieures à celles que l'on peut obtenir à terre pour des applications géodynamiques : la distance entre deux points distants de plusieurs centaines de kilomètres peut être estimée à moins de 5 mm près, au prix de l'utilisation du service PPS par un récepteur bifrèquence, sans AS et SA, et par des mesures répétées sur plusieurs jours. La précision verticale est de cinq à dix fois inférieure.

6. Les autres systèmes de positionnement radioélectrique

Depuis que les utilisateurs civils disposent du système GPS, les autres systèmes de radiolocalisation et radionavigation tendent à perdre de leur importance : en effet, pour un coût comparable, le système GPS offre des performances supérieures tant par la portée, la précision de navigation, l'intégrité du système que par la stabilité de l'information fournie. Cette avance s'accroît régulièrement par l'amélioration de la constellation des GPS, la plus grande facilité d'accès aux services (voir ch. 2 § 5.3.3) et l'évolution technique des récepteurs. Il convient néanmoins de connaître les grands principes d'autres systèmes de positionnement radioélectrique et d'être à même de les utiliser le cas échéant. Il faudra également rapporter leur précision respective à celle du GPS afin de pouvoir comparer des données acquises par des systèmes de positionnement différents.

6.1. Le système satellitaire TRANSIT : principe

Opérationnel depuis 1964 pour la Marine des États-Unis, et depuis 1968 pour les autres usagers, ce système a une importance historique puisqu'il fut le seul système de longue portée utilisable dans les grands océans du globe de 1968 à 1986 et capable de recalculer les routes estimées avec une précision acceptable mais très variable (en général de 100 à 1 500 mètres). C'est par ce système que les campagnes bathymétriques du navire océanographique *Jean Charcot* ont pu obtenir un positionnement dans le Pacifique et l'Atlantique par exemple. Il est bien sûr indispensable de connaître ces précisions quand on veut superposer les informations bathymétriques obtenues lors de différentes campagnes s'échelonnant de 1970 à aujourd'hui. Le GPS a très rapidement supplanté le TRANSIT, qui devrait cependant rester opérationnel quelques années encore.

Contrairement aux satellites GPS, les satellites du système TRANSIT sont peu nombreux (7 en 1991), ont une orbite basse (1 100 km), donc une période de révolution courte (107 minutes), et passent au-dessus des pôles. Comme le GPS, le système TRANSIT comprend trois segments (espace, contrôle, utilisateur) et émet sur deux fréquences (ici 150 et 400 MHz). À la réception, le signal d'un satellite est affecté d'un effet Doppler, qui est intégré entre deux positions successives du satellite pour fournir la différence de temps de parcours entre ces deux positions. Le satellite ne délivrant un message sur sa position que toutes les deux minutes, il faut pouvoir observer le satellite assez longtemps (de 10 à 15 minutes), assez haut sur l'horizon (plus de 10°) mais pas trop (moins de 70°) pour obtenir un point assez précis. L'erreur la plus importante sur le point est en conséquence celle qui provient du déplacement du navire pendant la mesure : ainsi une erreur de vitesse de 1 nœud provoque une erreur de 400 mètres en longitude en déplacement nord-sud et de 200 mètres en latitude en déplacement est-ouest. Par ailleurs la précision se dégrade à l'approche de l'équateur car les passages de satellites y sont plus rares (deux heures d'attente en moyenne, contre une heure à 60°). Enfin l'erreur sur la vitesse de propagation (réfraction ionosphérique) rajoute 100 m d'incertitude environ sur la mesure, et ne peut être corrigée que par un récepteur bifréquence.

TRANSIT est donc un système peu précis, à couverture mondiale mais discontinue dans le temps, ce qui impose une bonne navigation à l'estime ou un couplage avec un autre système de positionnement terrestre (Omega est fréquemment utilisé en navigation dite intégrée). Il est amené à disparaître, en raison de la médiocrité de ses performances comparées à celles du GPS.

6.2. Les systèmes radioélectriques terrestres

Ces systèmes étant de plus en plus marginaux en ce qui concerne les géosciences marines, nous nous limiterons ici à donner une idée des caractéristiques et performances comparées des principaux systèmes terrestres (cf. tableau, p. 344-345). Les principes d'émission, de mesure et de réception, et les gammes de fréquence utilisées ont été définies au ch. 2 § 4.

7. Positionnement sous la mer

7.1. Positionner un sous-marin autonome

Le géologue ou le géophysicien ne se contente pas seulement d'acquérir des données par des méthodes indirectes. Il a parfois besoin d'utiliser des moyens directs d'observation et de prélèvement d'échantillons, comme par exemple les sous-marins de grande profondeur (en France, le *Nautilus* et la *Cyana* de l'IFREMER). De nombreux progrès dans la compréhension du fonctionnement des grandes frontières de plaques ont en effet été apportés par l'exploration en sous-marin, aussi bien le long des dorsales océaniques que le long des zones de subduction.

Les systèmes de radiolocalisation ne sont pas opérationnels sous l'eau car les ondes électromagnétiques ne s'y propagent pas. On est alors obligé d'installer un réseau de balises acoustiques (fréquences d'émission de quelques kilohertz à quelques dizaines de kilohertz). Au nombre minimum de trois, ces balises sont immergées avant chaque plongée (une plongée du *Nautilus* dure environ huit heures). Au cours de l'opération de mouillage, chaque balise est positionnée très précisément par rapport au navire, lui-même positionné par rapport aux satellites du système GPS (figure 2.6a).

Ces balises sont à la fois émettrices et réceptrices : on peut ainsi les interroger et recevoir leurs signaux par l'utilisation de transpondeurs. Elles sont disposées en triangles et sont maintenues à une centaine de mètres du fond grâce à des flotteurs, ce qui assure une bonne intervisibilité des balises (ces flotteurs permettent également de récupérer les balises à la fin de la plongée). À intervalles réguliers, les balises interrogent alternativement le sous-marin puis le bateau. Elles sont elles-mêmes interrogées par le bateau et le sous-marin. On a donc en temps réel la position du navire et du sous-marin par rapport au même champ de balises. Les transpondeurs modernes permettent de mesurer des temps de parcours des ondes de l'ordre de la milliseconde, permettant d'approcher la précision du mètre.

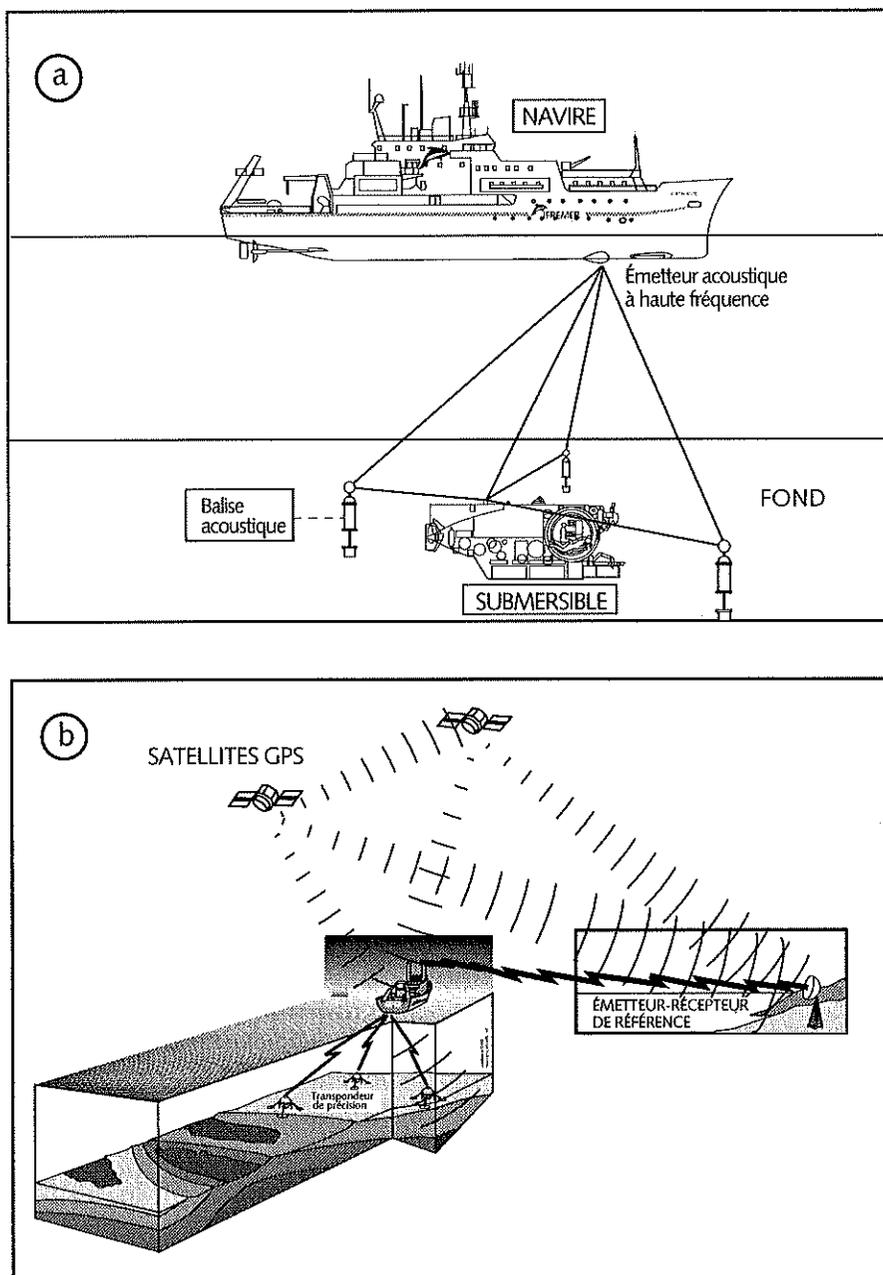


Figure 2.6: a. — Principe de positionnement près du fond d'un submersible par rapport à des balises acoustiques et au navire. b. — Concept de système géodésique combinant mesures acoustiques et GPS mis en place près d'une dorsale océanique active.

	Loran C	Oméga	Oméga différentiel
Mode de localisation	Hyperbolique (ou exceptionnellement circulaire)	Hyperbolique	Mesure des erreurs d'Oméga sur une zone large autour d'un radiophare
Type de mesure	Impulsions	Différence de phase	Correction de phase pour chaque émetteur
Type d'émission	Séquences de 8 à 9 impulsions codées, émises par 3 à 5 stations	Continue (entretenu)	Information de phase modulant une sous-porteuse à 20 Hz
Synchronisation	Stations maître et esclaves	2 stations synchronisées (4 horloges atomiques)	/
Fréquence d'émission	100 kHz (LF) (bande passante utile : 20 kHz)	10,2 à 13,6 kHz (VLF) (guide d'onde)	300 kHz (utilisation des émetteurs des radio-phares)
Portée	800 à 1 000 milles	mondiale	100 à 500 milles
Précision	100 à 500 m (parfois 2 milles pour trajets par onde de sol)	2 à 4 milles	500 m à 1 milles
Répétabilité	20 à 90 m	Mauvaise	Moyenne
Temps entre 2 mesures	10 à 20 points par secondes	Cycle de 10 secondes (émissions successives pendant 1 seconde environ par chaque station)	10 secondes
Avantages	Grande portée près des côtes (États-Unis, Méditerranée, ...)	Seul système terrestre à portée mondiale en continu	Amélioration importante de la position sur zones particulières
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> — Exploitation coûteuse — Non utilisable dans les grands océans — Couverture insuffisante — Mauvaise correction de vitesse près des côtes 	<ul style="list-style-type: none"> — Entretien et installation coûteux — Précision correcte seulement avec Oméga différentiel ou TRANSIT qui est complémentaire 	Zones couvertes plus nombreuses (Europe, façades de l'Atlantique central)
Perspectives	Loran C différentiel aux États-Unis	Limitées car non réellement complémentaire au GPS	Dépendance du système Oméga

	Decca	Syledis	Toran
Mode de localisation	Hyperbolique (le plus ancien des systèmes de ce type)	Hyperbolique (ou circulaire)	Hyperbolique
Type de mesure	Déphasage (après multiplication par une fréquence de comparaison)	Impulsion	Différence de phase
Type d'émission	Signal sinusoïdal non modulé	Modulation par code pseudo-aléatoire	Deux émetteurs de base en déphasage et une 3 ^e station de référence
Synchronisation	1 station maître, 3 stations esclaves (distances de 50 à 200 km)	Stations maître et esclave	Mesure de phases de battement et mesure de différence de phase avec la station de référence
Fréquence d'émission	70 à 130 kHz	400-450 MHz (VHF)	1,56 à 3,5 MHz
Portée	240 milles de jour, 150 milles de nuit	Environ 100 milles	30 milles à 100-150 milles
Précision		Excellente (quelques mètres)	Excellente (quelques mètres)
Répétabilité	Bonne (20 m)	Excellente (quelques mètres)	Excellente (quelques mètres)
Temps entre 2 mesures	Mesure continue jusqu'à 240 milles, puis toutes les 20 secondes	Continu	Continu
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> — Bonne répétabilité — Mesure continue 	<ul style="list-style-type: none"> — Excellente répétabilité — Utilisable en recherche pétrolière (flûtes) — Pas d'onde de nuit — Très précis (1 m) en vue radioélectrique 	<ul style="list-style-type: none"> — Excellente répétabilité — Précision excellente
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> — Zones couvertes limitées (près des côtes de l'Europe, Afrique, Pacifique nord) — Interférences de nuit par l'onde de ciel 	<ul style="list-style-type: none"> — Portée limitée (atténuation rapide) — Précision dépendante des conditions géométriques 	Limité à quelques zones côtières en France
Perspectives	Aucune (stations coûteuses, portée limitée)	Système concurrencé par le GPS	Faibles

Il est cependant fréquent que, du fait de la topographie accidentée du fond, certaines des balises du réseau soient masquées. Le submersible n'est alors plus repéré par les balises : il navigue à l'estime en tenant compte de son cap et de sa vitesse.

7.2. Positionner un objet sur le fond

Le même type de problème se pose lors de toute mise en place sur le fond (ou près du fond) d'un système qui nécessite un positionnement précis (forages, observatoire sous-marin pour la sismologie, sonars latéraux, instruments de mesure du magnétisme, des propriétés physiques du milieu, des déplacements tectoniques...). Des moyens similaires (ch. 2 § 7.1) sont généralement mis en œuvre. Atteindre une bonne précision de positionnement sur un point du fond est notamment fondamental lorsque l'on doit répéter une mesure ou une opération sur ce point particulier (c'est le cas par exemple d'un cône de rentrée dans un puits de forage).

Deux exemples illustrent cette démarche :

— La mesure des vitesses instantanées de déformation près des axes de dorsales actives (centres d'accrétion) est une des préoccupations importantes des géophysiciens et des cinématiciens. Il est aujourd'hui possible d'atteindre la précision du centimètre sur des zones de quelques kilomètres de large sur le fond de la mer, grâce à l'utilisation de transpondeurs de précision (de 13,5 kHz à 17,5 kHz) posés sur le fond (figure 2.6b). En plaçant le navire non loin de la verticale du centre de ce réseau sous-marin, et même sans connaître précisément les variations de vitesse du son dans l'eau (qui est la principale source d'incertitude), cet objectif peut être atteint, en combinant cette information acoustique avec celle qui est fournie par le système de positionnement GPS, aidé par des récepteurs de référence proches à terre. Si le taux d'accrétion moyen de la dorsale est suffisant (par exemple 5 cm/an), et la zone d'accumulation des déformations assez étroite (environ 5 km), alors la détermination des déplacements du fond de la mer (par répétition des mesures sur quelques années) est envisageable. C'est, par exemple, ce qui est tenté aujourd'hui par des équipes nord-américaines et canadiennes sur la ride Juan de Fuca, dans l'océan Pacifique. On a constitué là un des premiers systèmes géodésiques sous-marins.

— La mise en place de sismographes sous-marins (OBS : *Ocean Bottom Seismometer*) sur le fond de la mer (figure 2.7) répond à des besoins d'enregistrement d'ondes provenant de tremblements de terre (sismologie) ou de tirs provoqués (sismique marine). L'OBS étant un système autonome, largué depuis la surface, sa position peut légèrement varier lors de sa « chute libre » jusqu'au fond : pour obtenir des précisions de positionnement de quelques mètres, ou

pour orienter les composantes horizontales du sismographe à quelques degrés près par rapport au nord géographique, on pratique en général des tirs près de l'OBS grâce à des canons à air comprimé, et on analyse le temps d'arrivée de « l'onde dans l'eau » (onde allant directement de la source sismique, dont on connaît la position exacte et le temps origine, à l'OBS).

Cette technique reste néanmoins imparfaite, en raison notamment des variations de la vitesse des ondes acoustiques dans la tranche d'eau, et de l'imprécision dans l'identification de l'onde directe sur l'enregistrement de l'OBS, dans le cas où l'on travaille par faible profondeur.

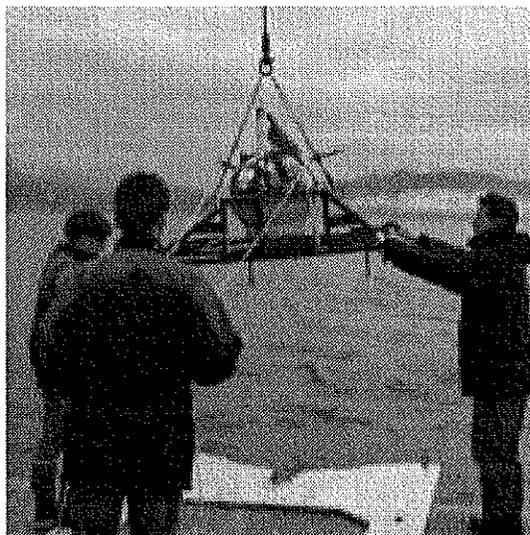


Figure 2.7 : Largage d'un système autonome d'enregistrement des ondes sismiques et acoustiques sur le fond : le sismographe sous-marin (OBS).

8. Application : recouplement de données acquises dans différentes périodes ou par différentes méthodes

En géosciences marines, il arrive fréquemment que l'on doive constituer une cartographie à partir de données hétérogènes, de qualité variable dans l'espace, en fonction de la façon dont elles ont été acquises. Il faudra souvent pratiquer deux opérations : d'abord recalcr ces données les unes par rapport aux autres, afin de vérifier leur réelle compatibilité à l'échelle où l'on veut travailler, et

ensuite interpoler ces données afin de produire une cartographie homogène sur un secteur donné.

La première phase de ce travail peut être illustrée sur un cas de bathymétrie en « Sea Beam » (sondeur multifaisceaux) : les courbes de niveau obtenues sur un même secteur lors de deux campagnes différentes peuvent permettre de tester la cohérence des données et d'estimer un décalage dans le positionnement entre ces campagnes (figure 2.8). On peut alors en déduire une précision moyenne sur la position des reliefs sous-marins.

La cartographie du fond par sonar latéral (système français SAR = système acoustique remorqué ; système américain Sea-Marc) obéit aux mêmes besoins : la morphologie du fond sera obtenue par la constitution de mosaïques issues de plusieurs passages de l'engin près du fond (souvent de 70 m à 500 m), avec des zones de recouvrement et de lacunes. La qualité du positionnement du poisson (qui possède sa balise acoustique) est évidemment primordiale pour une bonne restitution de la morphologie du fond (la précision théorique peut atteindre le mètre en relatif).

En aucun cas les cartes bathymétriques (à toutes les échelles) ne doivent donc être considérées avec le même regard que les cartes topographiques à l'air libre : elles ne peuvent pas (sauf exceptionnellement sur une zone limitée) fournir le même degré de précision, n'ont pas la même homogénéité, et sont issues d'une base de données interpolée, dont la qualité est susceptible d'évoluer en fonction de l'acquisition de nouvelles données.

Le même souci de validation et de recalage des données doit rester en mémoire quand on utilisera des bases de données numériques à couverture globale ou régionale (altimétrie, gravimétrie, magnétisme, bathymétrie) : il est en effet très fréquent que la précision recherchée ne corresponde pas à celle de la base considérée, ou que certaines longueurs d'onde soient absentes ou non représentatives, en fonction du mode d'interpolation choisi.

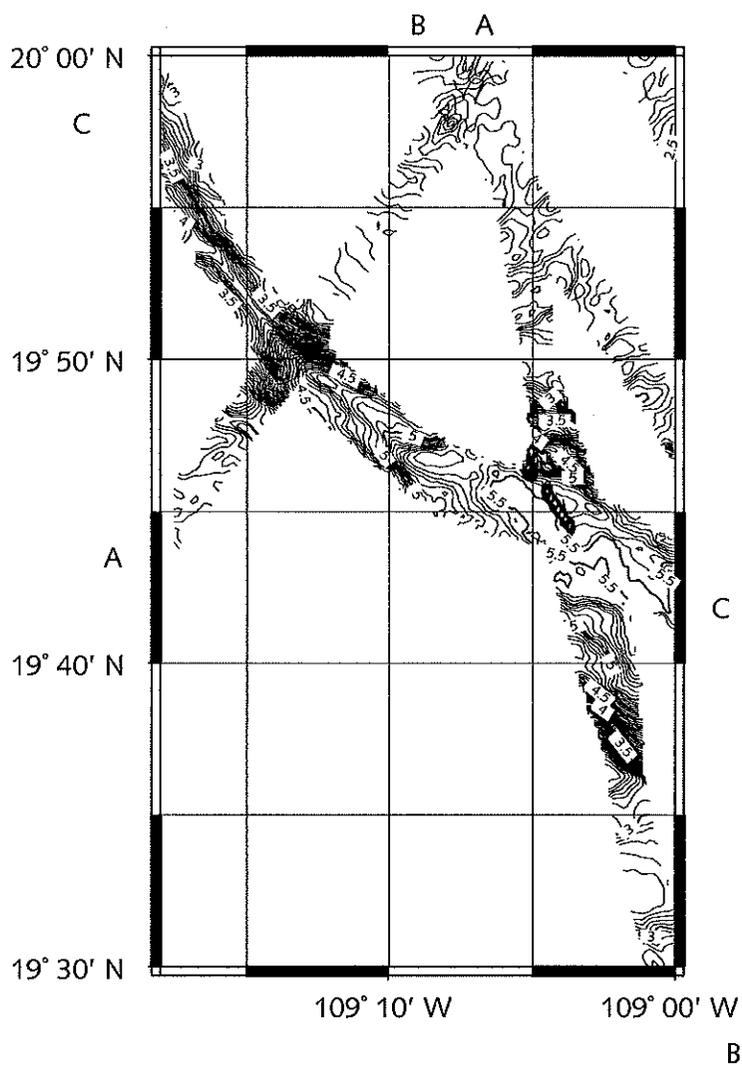


Figure 2.8 : Exemple de données bathymétriques Sea Beam issues de campagnes océanographiques différentes traversant la même zone. Au croisement des campagnes A et C, les courbes de niveau (espacement 50 m) ne se superposent pas en raison d'un décalage dans le positionnement. Au contraire les deux campagnes B et C montrent une bonne superposition des isobathes. Une correction visuelle peut être appliquée dans les zones de recouvrement des bandes.

Conclusions

Les données acquises en mer conservent une importance cruciale et viennent en complément des données satellitaires sur les grands océans.

— Le fait de reporter des points ou des routes sur une carte entraîne toujours des approximations, qui limitent dans des proportions variables leur précision : il faut avoir conscience de ces limitations, qui dépendent des choix de l'opérateur.

— La précision du positionnement obtenu en mer peut aussi varier considérablement suivant le type de mesure, ou l'instant et le lieu de mesure. Elle est à la merci de la dégradation temporaire de la réception ou d'une défaillance de l'acquisition numérique : il convient donc de toujours garder une capacité à naviguer à l'estime, de connaître les performances de son système et d'adapter la navigation au besoin spécifique du scientifique.

— Le positionnement par le système GPS tend à devenir prépondérant, les autres systèmes cherchent à rester complémentaires. En effet, il assure une couverture mondiale et continue avec une précision compatible avec la plupart des mesures effectuées en mer dans le domaine des géosciences marines.

— Il convient de rester prudent dans l'utilisation des bases de données numériques mondiales ou régionales, qui sont souvent interpolées et lissées : elles n'ont de valeur qu'à certaines longueurs d'onde et doivent être systématiquement contrôlées et validées, et si nécessaire recalées, ou repositionnées, par comparaison avec des données équivalentes acquises en mer.

Références principales pour en savoir plus

- CAILLOU M., LAURENT D. & PERCIER F., 1989. — *Traité de navigation*, Masson, Paris, 555 p.
- CALAIS E., 1996. — « GPS : un positionnement précis à la portée de tous », *Technologies Internationales*, n° 25, juin, p. 2-6.
- FOMBONNE, P., 1983. — *Radionavigation — radiolocalisation*, Masson, Paris, 304 p.
- HOFMANN-WELLENHOF B., LICHTENEGGER H. & COLLINS J., 1994. — *GPS theory and practice*, Springer-Verlag.
- MALING D.H., 1992. — *Coordinate systems and map projections* (2nd edition), Pergamon Press, Oxford, 476 p.
- SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE, 1988. — *Radionavigation*, n° 91, Paris.
- SERVICE HYDROGRAPHIQUE ET OCÉANOGRAPHIQUE DE LA MARINE, 1992. — *Guide du navigateur*, volume II (méthodes et instruments de navigation), Paris, 370 p.
- Serveur Web sur le GPS : <http://www.navtechgps.com/>

Remerciements

Nous remercions Yves Descatoire (CNRS) pour la réalisation et l'amélioration des graphiques.

Table des figures

Introduction

Fig. 0.1. La surface terrestre, le géoïde et l'ellipsoïde de référence	308
Fig. 0.2. Définition des coordonnées géographiques φ (latitude) et G (longitude)	309
Fig. 0.3. Variation de l'échelle des distances en fonction de la latitude φ , en projection de Mercator	310
Fig. 0.4. Visualisation de quelques types de projection de la sphère terrestre et de l'image obtenue en carte	311
Fig. 0.5. Principe de la projection cylindrique	313
Fig. 0.6. La projection de Mercator	314
Fig. 0.7. Échelles locales en un point de latitude φ_m	315
Fig. 0.8. Comparaison de deux projections. a. — projection de Mercator ; b. — projection conique conforme de Lambert	316

Chapitre premier

Fig. 1.1. Définition des angles par rapport au navire en navigation	318
Fig. 1.2. Schéma simplifié d'un gyrocompas	321
Fig. 1.3. Exemples d'instruments servant à estimer la vitesse de surface	323
Fig. 1.4. Routes orthodromiques ou loxodromiques	325
Fig. 1.5. Mesure d'un angle sur la carte (règle Cras)	326

Chapitre 2

Fig. 2.1. Principe de la navigation astronomique	330
Fig. 2.2. Principaux trajets suivis par les ondes électromagnétiques utilisées en radiolocalisation	331

Fig. 2.3. Positions des satellites GPS	335
Fig. 2.4. Représentation des codes pseudo-aléatoires émis par un satellite et un récepteur. δt est le décalage entre les deux codes.	336
Fig. 2.5. Principe de relais des signaux par une station terrestre GPS (GPS différentiel = DGPS).	339
Fig. 2.6. a. — Principe de positionnement près du fond d'un submersible par rapport à des balises acoustiques et au navire. b. — Concept de système géodésique combinant mesures acoustiques et GPS mis en place près d'une dorsale océanique active	343
Fig. 2.7. Largage d'un sismographe sous-marin	347
Fig. 2.8. Exemple de données bathymétriques Sea Beam	349

Achevé d'imprimer à Evreux
sur Rotative Numérique par

Book It!

Tél. : 01 55 38 94 88

