



Nivellement & marégraphie

Le contrôle des origines

Mesures du marégraphe de
Marseille, le 7 mai 2016.

Indispensables ancrages de l'altimétrie

Les préoccupations des géomètres en matière d'altimétrie ne sont pas près de disparaître, et même si la palette des méthodologies dans ce registre s'est enrichie avec l'utilisation des techniques GNSS pour les chantiers pas trop exigeants en matière de précision altimétrique, l'accessibilité à un réseau national bien entretenu comme le nivellement général de la France (NGF) est indispensable.

La marégraphie, quant à elle, n'est pas seulement un outillage de base du gestionnaire d'un port, c'est également un dispositif qui a pris une dimension scientifique très importante et conséquente, étroitement liée avec les réseaux de nivellement. Il est donc important d'avoir à l'esprit cet ensemble d'aspects très complexes lorsqu'on travaille sur les zones côtières, où se fréquentent deux systèmes d'altitude (NGF et hydrographique), avec une zone d'estran qui, pendant longtemps, n'était couverte par aucune administration. Mais, au-delà de cet aspect très concret, il est intéressant de voir combien certaines recherches fondamentales sur le climat peuvent tirer parti d'un réseau qui est à la base des activités courantes des géomètres.

La notion de niveau zéro pour définir des altitudes, très intuitive, est en fait passablement compliquée: comment le niveau moyen des mers, dont l'importance scientifique est majeure, lui est-il lié? Des idées reçues méritent d'être revues.

MICHEL KASSER
professeur de géodésie (HEIG-VD, Suisse)

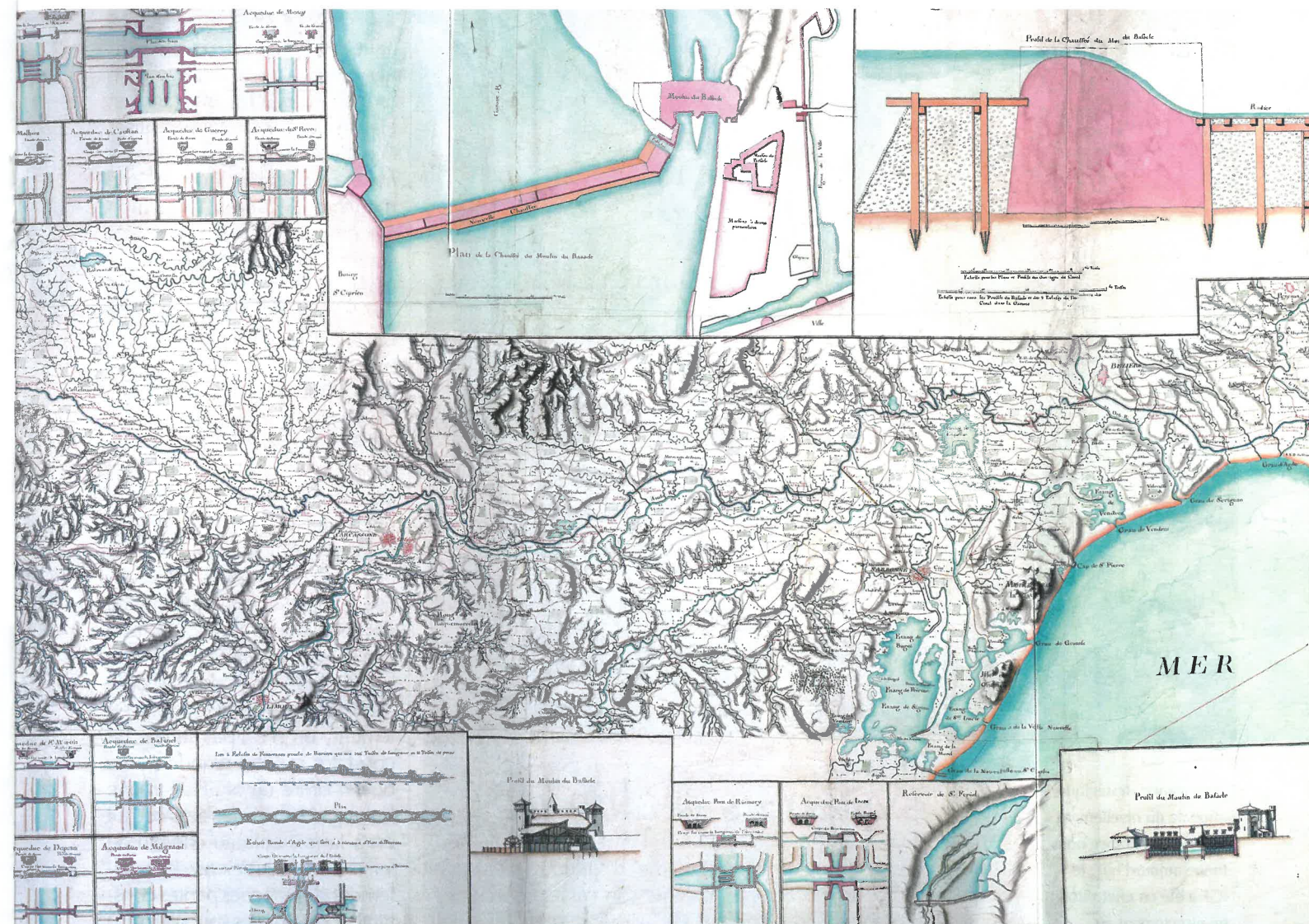
Le nivellement, autrement dit la mesure des altitudes, est aussi ancien que l'histoire de l'humanité. En effet, depuis que l'homme aménage son environnement, il est obligé de gérer en priorité l'écoulement naturel de l'eau. On trouve par exemple des traces de rigoles le long de certains grands monuments de l'Antiquité, permettant de visualiser une surface d'eau libre donnant une référence horizontale sur tout le périmètre du bâtiment, c'est déjà là un premier type de nivellement. Et, dès que les civilisations de l'Antiquité ont conçu des agglomérations, l'approvisionnement en eau et l'évacuation des eaux usées ont été deux problèmes essentiels, exigeant tous deux une maîtrise des pentes.

Pour des sites urbains situés dans des zones de plaines, ces pentes ne pouvaient être importantes, sous peine de conduire à des tranchées de plus en plus profondes, conduisant à des travaux trop onéreux avec les moyens humains, évidemment non

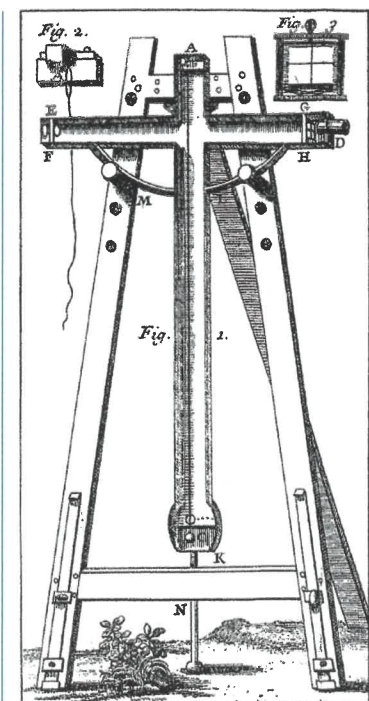
mécanisés, de cette époque. Après la brillante civilisation romaine, très consommatrice d'eau et qui a donc réalisé de nombreux aqueducs et égouts, le Moyen Age en Occident est assez largement une période de régression, avec comparativement peu de réalisations nouvelles, une grande partie des ouvrages romains ayant même souvent été négligés et abandonnés. En France, la centralisation du pouvoir a favorisé le lancement de grands travaux dès la Renaissance, et en particulier dans le domaine des canaux. Un bel exemple en est le canal du Midi dès le XVII^e siècle, qui a exigé des prouesses en matière d'altimétrie fine. Un autre, dont la documentation nous est parvenue, est liée aux travaux pharaoniques du château de Versailles lancés par Louis XIV, le plus grand chantier d'Europe à l'époque. Pour obtenir un approvisionnement régulier en eau sur ce site particulièrement mal choisi de ce point de vue, il a fallu chercher l'eau très loin,

avec des projets allant même jusqu'à la Loire. L'abbé Picard, qui a fait partie de l'Académie des sciences dès sa création en 1666, avait inventé la lunette à réticule encore en usage aujourd'hui, et avait ainsi permis un considérable gain en précision des appareils topographiques (d'un facteur allant jusqu'à 30). Il avait donc permis des nivellements très précis, et ses carnets de mesures, qui sont parvenus jusqu'à nous, permettent d'estimer que la précision qu'il pouvait obtenir était de l'ordre de un centimètre par kilomètre. Étonnamment, cette précision était à peine meilleure au milieu du XIX^e siècle, malgré les progrès réguliers en matière d'instrumentation!

Mais le XIX^e siècle verra aussi la naissance de deux préoccupations qui vont concourir à des demandes en nivellement: la santé publique et le développement des chemins de fer. Les travaux de Pasteur attirent en effet l'attention des autorités sur les microbes récemment découverts, et les pouvoirs publics cherchent à limiter les grandes épidémies, peste et choléra, qui font des apparitions fréquentes. L'épidémie de choléra de 1832 marque de ce point de vue une nouvelle prise de conscience: l'hygiène dans les villes est déplorable. On voit apparaître à cette époque les nouvelles théories hygiénistes, qui insistent sur la propreté corporelle, consommatrice d'eau, et sur >>>



D.R.



Ci-dessus, plan du projet du canal du Midi. Ci-contre, le niveau de Picard.

Double-page précédente: 7 mai 2016, en présence des télévisions nationales et régionales, les géomètres-experts ont effectué plusieurs séries de mesures simultanées sur quarante-quatre marégraphes des côtes françaises (ici Marseille).



L'importance stratégique nationale du nivellement général de la France nous étonne aujourd'hui : le NGF a été en effet rattaché directement au Premier ministre, et un bâtiment lui a même été spécifiquement construit, rue Gay-Lussac à Paris. Ci-dessus, un repère de nivellement du réseau Bourdaloué.

Les systèmes d'altitudes

Il y a dans la définition d'un système d'altitudes plusieurs éléments à prendre en compte, comme son caractère intuitif : « hauteur » au-dessus du « niveau de la mer », mais aussi la physique de base, pas toujours bien connue. Si on s'équipe d'un niveau et de mires parfaits, qu'on travaille parfaitement sans aucun phénomène perturbateur, et qu'on chemine entre deux points en additionnant les dénivelées dh_i obtenues, on constate que la dénivelée totale dépend du chemin suivi. Marseille-Lyon, en passant par la vallée du Rhône, par Grenoble, ou par le Massif central, conduisent ainsi à des différences de l'ordre du décimètre. Ceci est lié au fait qu'il est indispensable de prendre en compte la valeur g_i de la pesanteur, car seule la somme des $g_i \times dh_i$ le long du cheminement, qui représente le travail contre la force de pesanteur, est indépendante du chemin suivi. Pour construire un système d'altitudes, on calcule donc cette cote géopotentielle $\int g_i \times dh_i$ et on la divise par une grandeur proche du g moyen afin d'obtenir une grandeur qui ressemble quand même à une longueur, tout en restant homogène à un travail. Pour des altitudes normales, on va diviser par une pesanteur « normale » calculée de façon théorique sur le globe terrestre. Pour des altitudes orthométriques, ce sera une division par une valeur de pesanteur issue d'une modélisation très simple utilisant les mesures de gravité observées. Il est donc important de bien intégrer ces aspects peu intuitifs qui sont en amont de la notion d'altitudes.

►► une évacuation systématique des eaux usées et des latrines. Ainsi dans la seconde moitié du siècle, Belgrand et Haussmann vont faire réaliser des travaux considérables pour mettre en place un système moderne d'égouts à Paris. Bien évidemment, ces écoulements gravitaires dans une ville à faible relief exigent une forte infrastructure altimétrique. Les chemins de fer se répandent par ailleurs rapidement. Certes, le contact acier-acier est résistant à l'usure, mais son faible coefficient de frottement, qui limite évidemment les besoins en énergie, est en même temps une forte limitation technique : freinage médiocre, ce qui n'est pas très gênant pour les voyageurs, mais surtout impossibilité de franchir des pentes un peu marquées. Le tracé des nouvelles voies est donc très consommateur de données de nivellement ; on n'est pas surpris de constater qu'une grande partie du 1^{er} ordre du NGF se trouve le long de voies ferrées, ce qui est à la fois utile au chemin de fer et aux techniciens de nivellement : les longues pentes constantes de ces voies sont bien plus rapides à mesurer qu'une route, formée de montées et de descentes aléatoires.

Le NGF rénové après la Seconde Guerre mondiale

Ces considérations conduisent à une immense multiplication de réseaux de nivellement, d'extensions très variables, et surtout qui sont tous indépendants, avec des origines altimétriques arbitraires et différentes. Ceci entraîne des dépenses inutiles considérables et une extrême complication pour tous les chantiers de travaux publics de quelque importance, en particulier s'ils traitent d'écoulements gravitaires. L'idée d'un réseau unique et général

Des repères en perpétuel mouvement

Si, en théorie, il est simple d'observer une maille de 1^{er} ordre, puis d'appuyer sur ses repères des cheminements de 2^e ordre, etc., en pratique, les choses sont bien plus compliquées à cause du temps qui sépare ces différentes opérations (années, voire dizaines d'années). Entretemps, certains repères sont détruits et remplacés par d'autres (quelle est la fiabilité du rattachement qui a été fait ?) et tous ont l'occasion de bouger. Quelles sont les origines des mouvements verticaux de ces repères ?

Dans la plupart des cas, les repères sont scellés sur des bâtiments publics (églises, mairies, écoles, etc.) ou de petits ouvrages le long des routes, et les sédiments sur lesquels ils sont posés se tassent ou parfois, au contraire, gonflent (certaines argiles). En outre, ils suivent les mouvements de la nappe phréatique. Tout le monde peut remarquer les mouvements d'immeubles datant du Moyen Âge, avec des lignes caractéristiques qui furent certainement verticales et horizontales mais qui ne le sont plus ; on retrouve ces phénomènes sur les repères de nivellement fixés aux bâtiments. Et, quand ils sont fixés sur des rochers, il y a encore la possibilité de mouvements tectoniques, d'instabilités de versants et de glissements de terrain. Ceci sans même

évoquer le coup de masse assassin d'un passant de mauvaise humeur. Bref, à la surface de la Terre, il est difficile de trouver un endroit pour sceller un repère qui ne soit pas susceptible de bouger verticalement.

Prenons en exemple une maille de 1^{er} ordre, d'une ou plusieurs centaines de kilomètres de long, entièrement mesurée et fermée en six mois de mesures. On va la relier aux mailles voisines, dont l'une a été fermée il y a huit ans et une autre il y a vingt ans. Pourra-t-on imposer ces altitudes anciennes sur la nouvelle maille ? En théorie, oui. Mais, en pratique, on sera gêné par les mouvements des repères servant à lier ces mailles, mouvements impossibles à expertiser. Plus on procède lentement, plus il y a donc de problèmes qui retentissent sur la précision. Et, avec les matériels anciens (sans lecture de codes-barres), dès qu'une fermeture dépassait 1 cm, on se posait la question d'une faute de lecture non détectée. Le problème du nivellement direct est ainsi toujours le même : un nombre gigantesque de mesures, s'étendant sur un temps très long, avec très peu de fermetures, et donc une grande difficulté pour identifier les éventuelles fautes et les différencier des mouvements propres des repères.

d'altitudes pour tout le pays s'impose alors en France (ainsi que dans la plupart des pays occidentaux), et c'est en 1857 que commence pour sept ans l'observation du nivellement général de la France (NGF), sous l'autorité de Paul-Adrien Bourdaloué.

Cette première version du NGF (réseau Bourdaloué) donne une infrastructure permettant de relier les origines de tous les réseaux préexistants traversés, avec une erreur probable kilométrique de l'ordre du centimètre. Mais les besoins des travaux publics vont bien au-delà de ce premier réseau, et une fois passés les effets de la guerre de 1870, une nouvelle série de travaux va être lancée, sous la direction de Charles Lallemand, dès 1884 (réseau Lallemand). Cette fois, il va toujours s'agir de couvrir la France entière, mais avec quatre ordres emboîtés les uns dans les autres, atteignant chaque village. La précision

kilométrique du 1^{er} ordre s'établit aux alentours de 1,7 mm, grâce à l'emploi de nouveaux appareils bien plus précis et d'une meilleure méthodologie de terrain, tirant parti de l'expérience du réseau Bourdaloué. Par ailleurs, des mesures de pesanteur permettent de calculer les altitudes dans le système orthométrique (lire l'encadré page 36).

Lors de la création de l'IGN par décret le 26 juin 1940, le NGF lui est rattaché, puis intégré à la direction en charge de la géodésie. Mais, après la Seconde Guerre mondiale, le besoin de rénover le NGF commence à se faire sentir avec la destruction de repères à l'occasion des élargissements de routes et des chantiers de reconstruction. En outre, on conservait en archives quelques problèmes jamais vraiment bien résolus dans les mesures disponibles, liés au temps s'écoulant entre les diverses mesures (lire l'encadré ci-dessus).

La décision a donc été prise, au début des années 1960, de reprendre l'intégralité des mesures de 1^{er} ordre du NGF, et de recalculer tout le réseau selon cette nouvelle référence. Ces mesures ayant été terminées en 1969 en métropole, le réseau résultant a été appelé IGN-69. Mais il avait été prévu de changer complètement les altitudes diffusées. On en a donc profité pour changer aussi le mode de calcul de ces altitudes, en utilisant non plus les altitudes orthométriques mais les altitudes dites « normales », permettant une prise en compte plus efficace des mesures gravimétriques (lire l'encadré page 36).

Beaucoup de géomètres français se souviennent encore des difficultés engendrées par ce changement : le passage du mode de calcul orthométrique au normal n'aurait apporté que des modifications très mineures et sans importance pratique pour les usagers ; en ►►

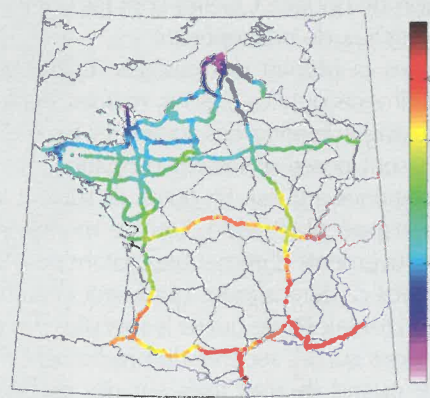
Les systématismes en nivellement direct

Le nivellement direct représente une méthode topométrique bien connue mais très particulière, où l'on peut totaliser des milliers de mesures avant d'obtenir le premier contrôle. Si, à la fermeture d'une boucle de 100 km, on trouve une faute de 1 m, comment en trouvera-t-on l'origine? Elle peut se situer n'importe où. Avant l'arrivée des niveaux à code-barres, on avait donc développé des processus de mesure avec un grand nombre de lectures à chaque station (typiquement 12), afin de pouvoir retrouver les fautes de lecture ou de report sur le carnet de terrain, ce qui ralentissait considérablement les travaux.

La plupart des pays occidentaux ont constaté ce phénomène lors de réitérations du 1^{er} ordre, un systématisme sensiblement Nord - Sud apparaissait

lors des comparaisons. Beaucoup de travaux ont été menés pour en trouver l'origine, mais rien de convaincant n'a finalement été identifié. Ce qui a été envisagé: effets du Soleil sur les branches du trépied; interaction entre les horaires de travail et l'évolution quotidienne de la réfraction; effets du champ magnétique terrestre (avec les niveaux à compensateur automatique); effets de l'éclairage du Soleil sur les mires, tant pour la dilatation thermique que pour des effets physiologiques sur la lecture par l'œil humain; effets liés à l'enfoncement des crapauds et du trépied dans le sol pendant les mesures, etc. Toujours est-il que, lors de la mise au point du nivellement motorisé (années 1980), même avant les niveaux à code-barres, ces effets

n'étaient plus visibles. On a supposé longtemps que le systématisme venait des mesures anciennes (NGF-Lallemand), pour constater finalement qu'il était réparti également, mais de sens contraire, entre lui et le récent NGF-IGN 69.



Ecart entre le NGF-IGN 69 et les mesures de référence modernes.

►► revanche, c'est l'ossature même de 1^{er} ordre, avec ses systématismes propres, qui a beaucoup varié entre le réseau Lallemand et le réseau IGN 1969. Avec un zéro à Marseille, l'écart entre les repères de Dunkerque atteignait 60 cm entre ces deux éditions, 35 cm à Paris, 20 cm à Lyon, pour ne citer qu'eux. L'origine de ces discordances est donc à imputer entièrement aux systématismes (essentiellement Nord - Sud) liés aux méthodes de mesure (lire l'encadré ci-dessus).

De grandes difficultés opérationnelles en ont résulté, avec bien des usagers qui ont mêlé des altitudes anciennes avec les nouvelles: de nombreux écoulements gravitaires neufs ont ainsi coulé à l'envers dans les années 1970 et 1980, provoquant de sérieux litiges et la perte de confiance qui en résulte vis-à-vis des géomètres. Changer une référence planimétrique est très simple, il suffit d'ajouter une

constante sur les x et les y, car il n'y a pas d'origine absolue qui aille de soi. Mais il n'en est rien pour les altitudes, où l'on ne peut ajouter par exemple 10 000 m aux valeurs nouvelles, car les altitudes ont une valeur intuitive, de distance à une surface qui se rapproche du niveau de la mer.

Evidemment, il aurait suffi que les usagers achètent les nouvelles fiches signalétiques et le problème ne se serait pas posé. Mais ceux qui avaient d'anciennes fiches ne voyaient aucune raison de les jeter et d'en acheter d'autres... Il aura fallu attendre le début du XXI^e siècle pour que ce problème se résolve de lui-même, avec le serveur gratuit de fiches signalétiques mis en place par l'IGN dès 2002. Actuellement, ce sont près de 400 000 repères qui sont mis à disposition sur tout le territoire. Pour le réseau Bourdaloué, le zéro fut fixé en 1860 au trait de 0,40 m de l'échelle de marée du

fort Saint-Jean à Marseille. Pourquoi fixer le zéro à Marseille? On pensait à l'époque qu'il n'y avait pas de marées en Méditerranée, et que le niveau moyen de la mer donnerait une référence facile d'accès. Pour le réseau Lallemand, le zéro a été fixé d'après une série de mesures marégraphiques à Marseille menée entre 1885 et 1897. Il a été observé à 7 cm au-dessous du zéro précédent, ce qui a posé peu de problèmes pratiques au vu des imprécisions du premier réseau. Ces mesures marégraphiques avaient été obtenues avec un appareil spécialement développé pour l'occasion, et avaient conduit à comprendre que le niveau de la Méditerranée ne cessait d'évoluer, et ne pouvait donc servir de référence à long terme. C'est donc tout un ensemble de repères qui ont été cotés dans la région de Marseille à partir de ce zéro arbitraire et qui servent réellement de matérialisation du zéro NGF.



D.R.

La marégraphie

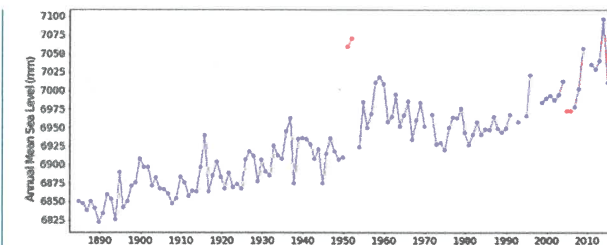
Le lien entre nivellement et marégraphie semble alors naturel: il revient aux marégraphes d'aider à fixer le zéro du nivellement. Mais il sera aisé de voir que ce lien est bien plus complexe.

Pourquoi a-t-on installé des marégraphes dans les ports? L'utilité la plus immédiate est de connaître le niveau de la mer au moment où un navire ayant un tirant d'eau donné entre dans le port. Mais, au-delà de cet usage instantané, on a tiré un grand parti des enregistrements continus des hauteurs d'eau, on a pu en faire une analyse mathématique permettant ensuite de prédire les marées futures et leur amplitude, le seul terme imprévisible mais généralement mineur (sauf fortes dépressions) étant lié à la pression atmosphérique.

Un élément supplémentaire est lié à la définition du système de

référence altimétrique employé pour les cartes marines. Cette référence est ainsi faite que, lorsqu'une mesure de profondeur est mentionnée (rocher, épave, etc.), il y a toujours au moins autant de hauteur d'eau que cette valeur, et généralement davantage, mais jamais moins, afin d'éviter qu'un navire ne talonne sur cet obstacle. Le zéro hydrographique correspond donc au niveau théorique, atteint par les plus basses mers (marées de coefficient 120), calculé à partir des données des marégraphes. Lorsqu'un navire océanographique cartographie des profondeurs (pour obtenir ces cartes marines ou bathymétriques), il doit donc corriger ses mesures des variations de niveau de la mer, telles qu'enregistrées au plus proche marégraphe. Ces corrections se font simplement à partir de l'heure des observations.

Néanmoins, toute une série de difficultés sont issues de ces



Niveau de la Méditerranée à Marseille. Ce sont les mesures entre 1885 et 1897 qui ont montré que le niveau de la Méditerranée ne pouvait valablement servir de référence précise au NGF. On note l'effet des grands barrages des années 1950 et 1960 sur tous les fleuves qui se jettent dans cette mer, provoquant un abaissement du niveau durant plusieurs décennies. Ci-dessus, à Marseille lors de l'opération marégraphes menée par les géomètres-experts le 7 mai 2016.

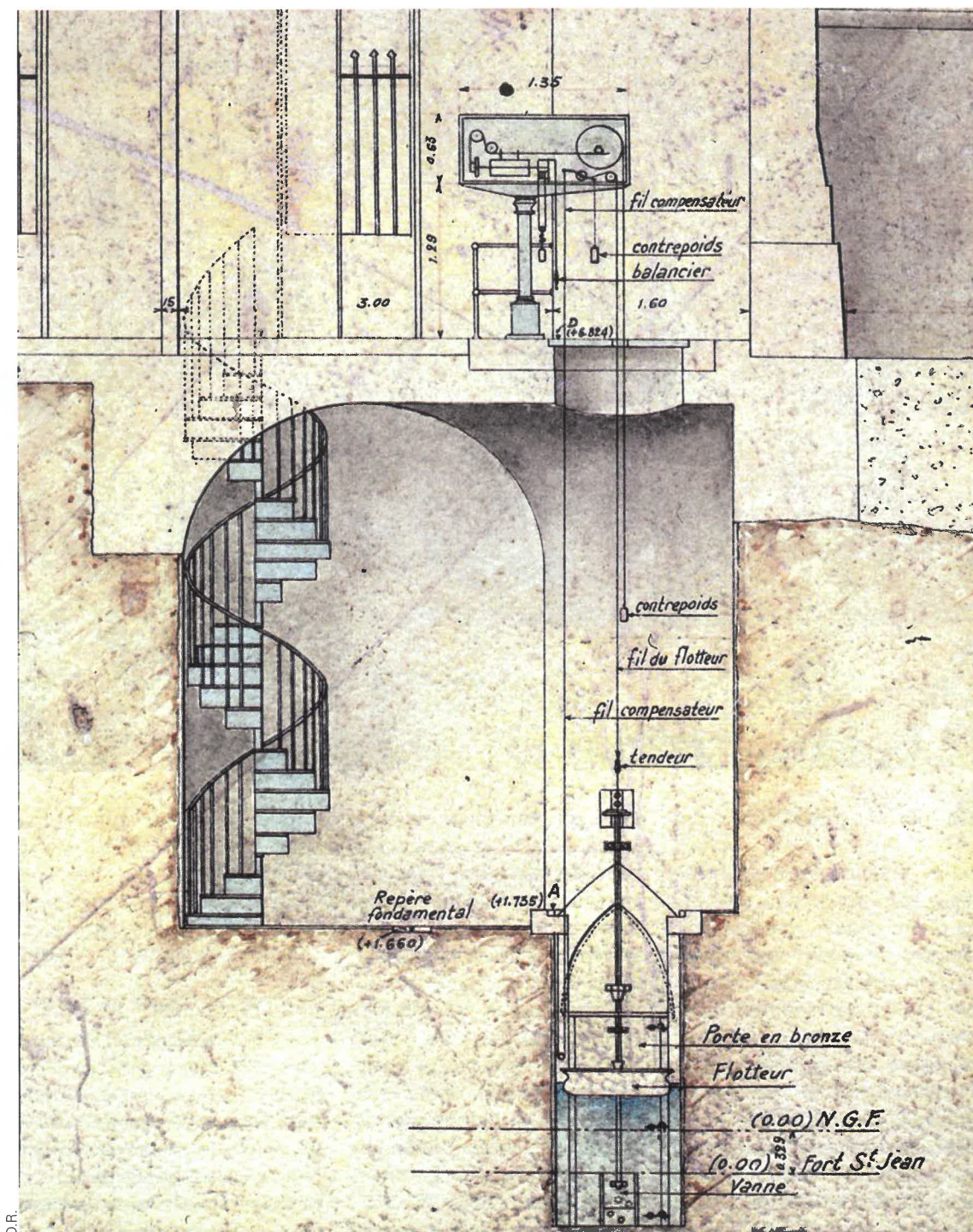
notions. Quels sont les paramètres qui influencent le niveau de la mer observé en un endroit donné? Où se situe le zéro hydrographique par rapport au NGF? Voici quelques éléments de réponses...

Les phénomènes qui influencent le niveau de la mer sont nombreux, on peut citer les marées et la pression atmosphérique ►►

LA MÉCANIQUE DES MARÉGRAPHES

Les marégraphes du XIX^e siècle, à l'image de celui de Marseille, sont des marégraphes mécaniques à flotteur, constitués d'abord d'un puits de tranquillisation où l'eau de mer pénètre mais où l'effet de la houle et des vagues est très largement atténué. Dans ce puits se trouve un flotteur qui suit les mouvements verticaux de la mer causés par les marées et les changements météorologiques. Un câble métallique transmet les mouvements du flotteur à l'appareil enregistreur. Un ensemble d'engrenages les communique à un organe scripteur qui trace une courbe des variations du niveau de la mer en fonction du temps. Un mouvement d'horlogerie commande le déplacement du cylindre porteur du papier. Le diagramme ainsi réalisé est appelé un marégramme.

(source : IGN)



rique (quand elle augmente, elle a tendance à faire baisser le niveau), mais aussi la salinité et la température qui font varier la densité. Ainsi, un changement de courant côtier peut déplacer le flux d'eau douce d'un fleuve voisin, diminuant la salinité locale, ce qui fera monter momentanément le niveau (cas du Rhône pour Marseille). En outre, il existe des phénomènes glo-

baux plus ou moins bien connus : le réchauffement moyen des mers crée une dilatation globale des eaux, et la fonte des glaces polaires et continentales contribue aussi au relèvement des niveaux (2 à 3 mm/an en moyenne sur l'ensemble des océans). À l'inverse, l'installation de barrages sur tous les fleuves de la Méditerranée a provoqué un déficit en eau tellement

marqué qu'à partir des années 1960, et ceci pendant près de quarante ans, le niveau n'a pas suivi la montée générale des eaux de la planète. La marée océanique est très liée à la marée terrestre. Sous l'effet de l'attraction de la Lune et du Soleil, l'ensemble de la Terre qui a un comportement viscoélastique se déforme selon deux cycles, ceux du Soleil et de la

La géométrie de l'océan Atlantique permet une résonance avec les « marées terrestres ». Les amplifications sont très variables selon le site. Elles atteignent par exemple une amplitude totale de 13 m au Mont-Saint-Michel.



D.R.

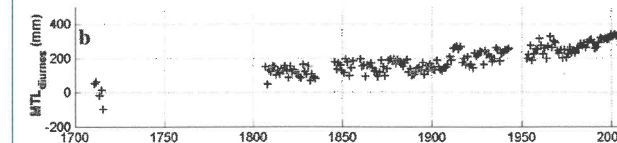
L'écorce terrestre subit un rebond post-glaciaire

Lorsque s'est terminée la dernière glaciation, il y a plus de 10 000 ans, la disparition des énormes glaciers couvrant l'Europe et surtout la Scandinavie a provoqué un allègement rapide de l'écorce terrestre, qui a réagi par un rééquilibrage isostatique : ces zones se sont mises à remonter progressivement. Ainsi, en Scandinavie, les repères de nivellement ont des vitesses verticales qui atteignent 1 cm/an en Finlande et, sur le massif alpin,

1,5 mm/an. Ceci complique d'autant l'entretien du réseau d'altitudes et a par exemple conduit la Suisse à se doter de deux systèmes d'altitudes, l'un (NF02) qui est la référence officielle, convenable pour tous les travaux courants, et l'autre (RAN95) à caractère scientifique, librement accessible également, mais qui est nettement plus précis, intégrant en particulier les vitesses verticales des repères dans la zone des Alpes.

Lune. Les autres planètes ont des effets comparativement négligeables. Ces déformations amènent un point quelconque du sol à bouger d'environ 30 cm par rapport au centre de la Terre selon ces deux cycles. Cela a peu de conséquences pratiques sur les terres émergées, car, pour chaque observateur, c'est toute la région autour de lui qui monte et descend de 30 cm, et on ne remarque donc rien. En revanche, ce phénomène crée une excitation dans les masses océaniques et, selon la géométrie des côtes et la bathymétrie, une résonance plus ou moins marquée intervient. C'est ainsi que la géométrie de la mer Méditerranée ne permet pratiquement aucune résonance, alors que celle de l'océan Atlantique y est au contraire assez favorable, avec des amplifications très variables selon le site (amplitude totale qui atteint par exemple 13 m au Mont-Saint-Michel). Mais, sur un tronçon de

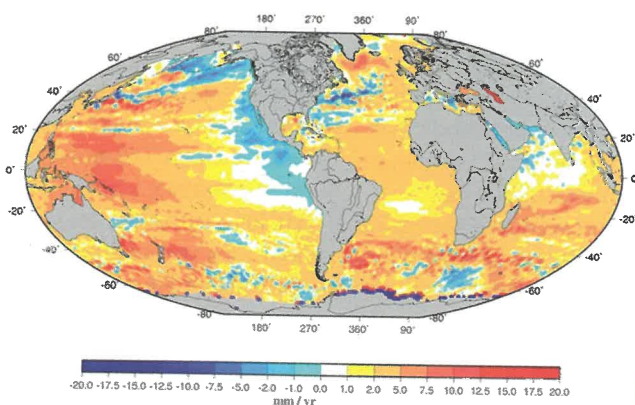
côte, que se passe-t-il si, dans deux ports voisins, les amplitudes de marées sont différentes ? On y constatera des valeurs différentes du zéro hydrographique par rapport au NGF. La cartographie du zéro hydro est donc une opération nécessaire pour la cartographie marine, mais elle est techniquement très complexe. Elle implique une connaissance du géoïde local, une mesure de la marée à un marégraphe côtier de référence, et une série de mesures de l'altitude NGF d'un navire au cours d'un cycle de marée, grâce à des mesures GNSS de grande précision : c'est le service hydrographique et océanographique de la marine (Shom) qui, en France, est chargé de cette importante mission. On comprend donc pourquoi il est vain d'espérer obtenir quelque part un niveau moyen de la mer suffisamment stable pour en faire une référence altimétrique précise à long terme. ➤



Moyennes diurnes de la marée à Brest sur trois siècles (thèse de N. Pouvreau, 2008). Malgré les lacunes, la tendance de l'ordre de 1 mm/an s'évalue pas actuellement de manière très visible sur ce site.

► Enjeux scientifiques actuels de la marégraphie

De nombreuses questions scientifiques ont été posées récemment à la marégraphie, face aux enjeux désormais très populaires du réchauffement climatique... Quelle est l'augmentation du niveau de la mer? Y a-t-il une évolution récente? Etc. On a donc mis en place les moyens nécessaires pour juger de la fiabilité des mesures des marégraphes ayant une grande ancienneté (près de trois siècles à Brest, Amsterdam, Liverpool, etc.). Le principe a consisté à leur associer une station GNSS permanente et à les raccorder régulièrement au NGF, afin de juger de la stabilité géométrique de leur installation. En mesurant continuellement leur distance au centre de la Terre sur deux décennies voire plus, on peut ainsi garantir que les mesures apparentes du marégraphe cor-



Evolution du niveau des mers entre 1993 et 2007, calculée par le laboratoire Legos (Toulouse) à partir des missions spatiales Topex-Poséidon et Jason.

respondent bien à de vraies variations absolues du niveau de la mer. Dans certains cas, comme à Amsterdam, on a pu corriger efficacement les mesures historiques à partir de ces observations: rebond post-glaciaire (lire l'encadré page 41), tassements locaux. C'est une campagne de ce type

que viennent de réaliser les géomètres-experts, avec l'« opération marégraphes » (1) menée sur le contour du littoral français. En parallèle, diverses missions spatiales (lire page 43) ont permis de cartographier le niveau de la mer et de mesurer son évolution moyenne sur l'ensemble des océans, mais seulement sur quelques décennies. On y note une extrême variabilité allant, selon les sites, de +2 à -2 cm/an. Et c'est là que les sites dotés d'un marégraphe apportent une aide précieuse, en donnant une vérité terrain ponctuelle qui aide à valider le résultat global.

Evolutions récentes des réseaux de nivellement

Le nivellement général de la France représente un héritage considérable, extrêmement utile mais dont il était impensable d'assurer l'entretien en utilisant les technologies qui ont servi dès son origine, le nivellement direct, devenu beaucoup trop coûteux en main d'œuvre. Une importante remise à jour a donc été entreprise dès la fin du siècle dernier, en profitant des nombreux développements devenus utilisables:

- un géoïde précis à quelques centimètres, calculé sur toute la France;
- des stations GNSS permanentes réparties régulièrement;
- des logiciels scientifiques très complexes mais permettant de calculer des missions GNSS en altimétrie avec une précision absolue de l'ordre du centimètre, ce que ne permettent pas les logiciels commerciaux courants;
- une série d'observations GNSS de haute précision sur un grand nombre de points du NGF et du RBF, avec en outre une modernisation de la gravimétrie disponible sur ces points du RBF;
- etc.

Il en est résulté toute une série de nouveaux éléments:

- définition d'une surface d'altitude nulle de précision centimétrique sur tout le pays, interpolant fidèlement les défauts du NGF entre ses points mesurés en GNSS, ce qui permet de délivrer des altitudes NGF lorsqu'on utilise des GNSS en tout point du territoire;
- une nouvelle méthodologie d'entretien du NGF, largement basée sur les GNSS, plusieurs dizaines de fois moins coûteuse que le nivellement direct ancien, et qui permet de maintenir la totalité du réseau sur un cycle décennal, conforme aux besoins des géomètres;
- une série de grandes traverses de nivellement de très haute précision, le nivellement scientifique de référence ou Niref, qui relie les réseaux des pays limitrophes et les principaux marégraphes. Ainsi, le nivellement français est-il solidement relié avec celui des pays européens, et la diversité de leurs zéros ne pose donc plus aucun problème opérationnel, comme c'est aussi le cas avec les références planimétriques (Euref).

On peut d'ailleurs en profiter pour citer ici toute une série de conclusions obtenues par l'IGN à l'occasion de l'application de ces traverses de Niref sur les marégraphes qui lui sont reliés. On y retrouve en particulier ce qui est connu par ailleurs, le fait que la Méditerranée étant plus salée que l'Atlantique (déficit lié à l'évaporation non compensée par les apports en eaux douces des fleuves), son niveau est plus bas que celui de l'Atlantique de près de vingt centimètres. ■

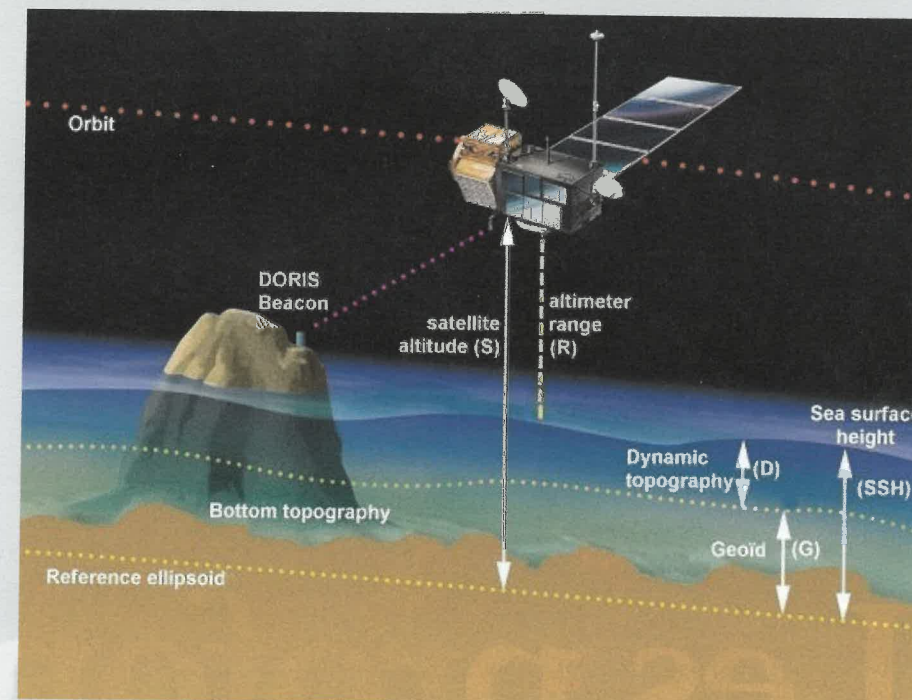
(1) Le 7 mai 2016, en partenariat avec l'IGN, le Shom, l'université de La Rochelle, l'université de Toulouse III - Paul Sabatier et le CNRS, les géomètres-experts ont mené une opération inédite de mesure simultanée de 44 marégraphes situés sur la bande littorale (lire Géomètre n° 2134, mars 2016, page 6).

La mission Topex-Poséidon d'altimétrie spatiale

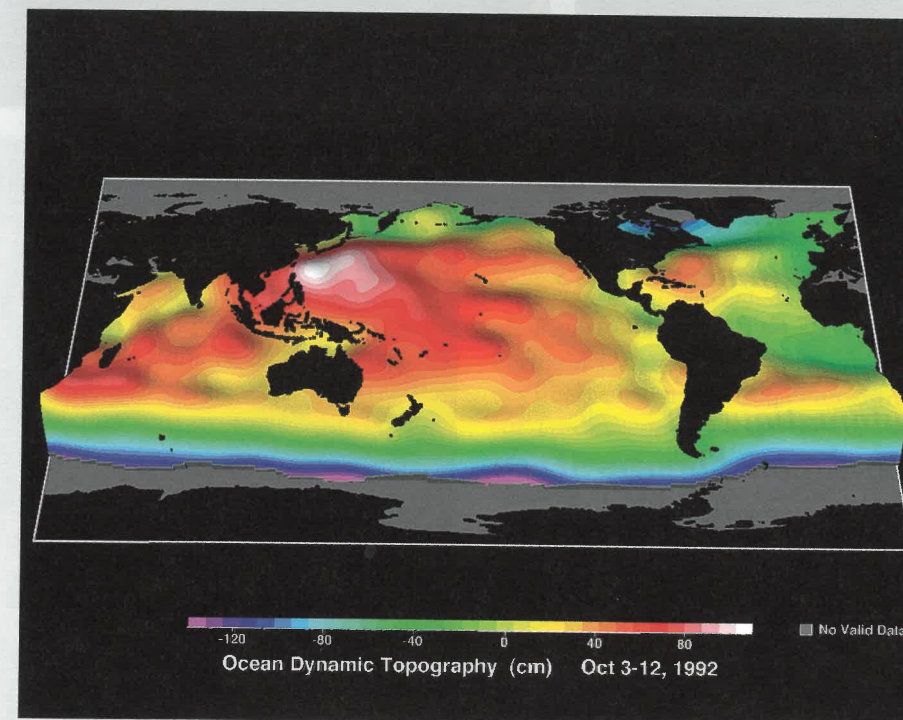
Suite à des - brèves mais prometteuses - missions pionnières au début des années 1980, la première grande mission d'océanographie spatiale a été une mission commune Cnes-Nasa nommée Topex-Poséidon, et son succès a été tel qu'elle a été suivie par Jason-1, Jason-2, puis maintenant Jason-3, afin que ces mesures ne s'interrompent pas.

Leur principe est d'envoyer une onde radar verticalement depuis un satellite, afin de mesurer où est exactement la surface de la mer moyennée sur quelques kilomètres carrés sous la trace du satellite à un instant donné. Bien évidemment, ceci n'est utile que si l'on sait exactement où se situe le satellite, et les moyens d'orbitographie embarqués (Doris + GPS + laser) permettent de le savoir avec une précision de l'ordre du centimètre. On en déduit l'altitude de la surface de la mer sur la planète entière, là encore à 1 cm près, semaine après semaine.

Ainsi, on peut suivre les variations des courants chauds (qui forment des bosses, jusqu'à 1 m de haut) et froids (formant des creux), ce qui est fondamental pour comprendre l'évolution du climat mondial, et par exemple de l'événement El Niño. On en tire aussi la position moyenne mondiale de cette surface au cours du temps qui nous intéresse et, autre sous-produit, une carte ultra-précise du géoïde sur les zones océaniques. Cette dernière permet d'ailleurs à son tour de cartographier grossièrement les chaînes de montagnes sous-marines. ■



Principe global de la mission Topex-Poséidon



Résultat pour une semaine de mesures: topographie des océans vue par Topex-Poséidon.