

SONEL – Système d’Observation du Niveau des Eaux Littorales

Par Guy Wöppelmann, gwoppelm@univ-lr.fr

Centre Littoral de Géophysique, Université de La Rochelle

Introduction

SONEL est un système d’observation du niveau des eaux littorales construit avec le concours du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM), de l’Institut Géographique National (IGN) et du CNRS (UMR 5566). Le système repose sur une fédération de réseaux de marégraphes côtiers et de récepteurs GPS permanents. Certains marégraphes, comme ceux de Brest et de Marseille, figurent dans presque toutes les études qui ont conduit le *groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat* (GIEC) à conclure à une augmentation probable du niveau des mers de quelque vingt centimètres sur les cent dernières années. SONEL se situe donc dans la problématique des variations climatiques du niveau marin. Nous proposons ici de décrire l’infrastructure d’observatoire de recherche que constitue SONEL : ses fondements, son fonctionnement, ses utilisateurs, sa place dans le tissu international, notamment dans les programmes GLOSS¹ et TIGA². Les éléments et le succès de ces programmes dépendent des contributions volontaires à l’échelle des pays. L’idée de SONEL est de répondre à cette attente à l’échelle de la France.

I. Le contexte

1. Cadre international

L’étude et la surveillance des variations climatiques récentes et actuelles du niveau de la mer s’organisent autour du programme GLOSS de la Commission Océanographique Intergouvernementale de l’UNESCO. Ce programme mondial s’appuie sur un réseau de quelque 300 stations de marégraphie côtière autour duquel s’articulent des réseaux thématiques et des réseaux régionaux permettant d’appréhender les structures méso-échelle, ainsi que les processus complexes qui siègent dans la zone littorale [COI, 1997].

Il est important de savoir que GLOSS n’a pas de moyens propres pour développer un tel réseau d’observatoires. L’action du programme GLOSS se situe essentiellement dans la coordination des ressources et des efforts des participants. Son succès dépend de la *participation volontaire* des pays et des organismes à l’échelle nationale. C’est à ce niveau que doivent être mobilisés les moyens concrets.

La France est sans aucun doute l’un des pays les plus riches en observations du niveau marin. Ce sont les illustres astronomes La Hire et Picard qui, en 1679, réalisèrent les premières mesures systématiques de cette grandeur dans la rade de Brest. Leur objectif : l’étude de la marée ; leurs résultats montreront l’intérêt de l’observation systématique du niveau de la mer pour comprendre et prédire les processus à l’origine des fluctuations de celui-ci. Dès lors, les observations vont se multiplier sur l’ensemble du territoire, favorisées par l’invention du marégraphe par l’ingénieur hydrographe français Chazallon en 1842.

Malgré cet héritage et cette richesse en observations du niveau de la mer, la contribution française au dispositif mondial reste modeste et manque de structure de coordination. Nombreux sont les organismes qui, dans le cadre de leurs missions, exploitent des marégraphes en France. Aucune obligation ou engagement ne les lie aux activités d’intérêt scientifique mentionnés ici. Des actions sont néanmoins possibles ponctuellement à travers des conventions, mais elles sont limitées et inadaptées aux besoins de certaines applications visées. Les initiatives sont individuelles et dépendent souvent de l’intérêt ou de la conscience d’une personne, ou d’un petit groupe de personnes, au sein de ces organismes. Lorsque ces personnes quittent leur fonction, la question de la pérennité des activités engagées se pose. Dans ce contexte incertain et précaire, SONEL a pour ambition d’organiser de manière raisonnée et rationnelle les ressources et les efforts réalisés pour observer les mouvements du niveau de la mer en zone littorale.

¹ Global Sea-level Observing System (Commission Océanographique Intergouvernementale, UNESCO)

²Projet pilote du service international GPS pour la géodynamique : GPS Tide Gauge Benchmark Monitoring

2. Problématique scientifique

Le niveau de la mer constitue un paramètre important pour valider les théories de réchauffement climatique et pour améliorer les prédictions des modèles. Selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, le niveau général de la mer se serait élevé de 10 à 25 centimètres sur les cent dernières années [IPCC, 2001]. Mais la question de l'élévation récente du niveau de la mer n'est pas simple, en particulier à la côte [Cabanès et al, 2001]. Les différentes approches menées jusqu'à présent pour analyser les données des marégraphes et en extraire une tendance globale du niveau des mers présentent des faiblesses qu'il convient de garder à l'esprit lorsqu'on considère les chiffres mentionnés ci-dessus. Ces faiblesses recèlent des erreurs systématiques potentielles qui peuvent remettre en question les valeurs admises aujourd'hui.

Les études réalisées à ce jour soulignent l'importance de travailler sur des séries chronologiques longues : une durée d'au moins 50 ans semble indispensable pour filtrer les signaux décennaux et inter-décennaux, et par suite estimer une tendance significative liée à un réchauffement climatique. Cependant, les données enregistrées par les marégraphes font souvent apparaître des tendances contradictoires. Cela s'explique en partie par le caractère relatif de la mesure marégraphique, qui fournit une information de niveau de la mer par rapport à l'écorce terrestre. Un affaissement du sol, d'origine locale ou régionale, à l'endroit où est implanté l'observatoire, aura un effet analogue à une élévation absolue du niveau de la mer provoquée par la fonte des glaces continentales. La plupart du temps, les deux phénomènes, terrestre et océanique, sont présents dans les enregistrements marégraphiques. Il s'agit donc de les séparer.

Plusieurs auteurs ont étudié la possibilité d'utiliser des modèles géophysiques pour corriger les enregistrements marégraphiques, en particulier de l'effet de rebond post-glaciaire. Les incertitudes des corrections sont toutefois encore trop importantes. Woodworth [2003] conclut qu'il ne resterait plus qu'à tenter de les mesurer, si cela est possible...

3. Applications

L'évolution à long terme du niveau de la mer est une des applications scientifiques clairement visées. Nous avons vu que les mouvements sont lents et ténus, sur plusieurs décennies, voire siècles. Il convient cependant de souligner que les impacts d'une élévation du niveau de la mer ne se produiront pas graduellement, mais par à-coups, au moment des surcotes marines provoquées par des tempêtes. L'étude des surcotes, et celle de l'évolution de leur fréquence, sont indispensables pour prévoir l'évolution et les risques dans les régions littorales sensibles à l'inondation ou à l'érosion. Mais ces études ne peuvent être menées de manière satisfaisante sans une analyse des longues séries temporelles d'enregistrements de marégraphie côtière [Bouligand et Pirazzoli 1999]. Un champ d'application large s'ouvre alors sur l'étude des corrélations avec les phénomènes météorologiques et climatiques, à condition bien entendu de disposer d'un système d'observation météorologique complémentaire adapté. Ceci permettra une modélisation des interactions atmosphère – océans à l'échelle locale et, par suite, la mise en place de systèmes de prévisions. Enfin, toujours est-il que les exploitations possibles envisagées d'ores déjà par certains utilisateurs du système SONEL sont nombreuses : l'évaluation et la validation des résultats d'altimétrie spatiale ; l'étude des références verticales et leurs relations (géoïde, ellipsoïde...), etc.

II. Stratégies d'observation

1. Synergie avec la géodésie spatiale

Les systèmes spatiaux de positionnement précis et la gravimétrie absolue peuvent désormais apporter un complément métrologique notable pour résoudre le problème d'interprétation géophysique associé à la mesure relative des marégraphes. L'apport des techniques de géodésie spatiale se situe à deux niveaux, d'une part la réalisation d'un système de référence terrestre précis et stable, d'autre part la détermination de positions et de vitesses de points à la surface de la Terre dans ce même système de référence, notamment sur la composante verticale [Altamimi et al, 2003]. L'information apportée par la gravimétrie absolue est également intéressante à deux titres, d'une part la précision des résultats sur les déplacements est analogue à celle des meilleures techniques spatiales de positionnement, d'autre part elle fournit une information de nature complémentaire, physique, alors que l'information des techniques spatiales de localisation est géométrique. Cette complémentarité est utile pour mener à bien des études comparatives et permet de mieux comprendre la nature des mouvements observés [Zerbini et al, 2001].

Parmi les techniques spatiales de positionnement, le choix du GPS s'est rapidement imposé pour mesurer les mouvements géophysiques. C'est une technique de mise en œuvre aisée, qui fournit des résultats de qualité à coût raisonnable. La précision des mesures de positionnement est telle que l'on devrait pouvoir déterminer des vitesses à la surface de la Terre avec une exactitude de 1-2 mm/an sur des intervalles de cinq ans dans le système de référence terrestre international (ITRS), et de 0.3-0.5 mm/an sur plusieurs décennies [Neilan et al, 1997]. Depuis quelques années, des stations GPS permanentes sont implantées à proximité des marégraphes dans le but de les rattacher dans ce repère international.

La tâche n'est toutefois pas aisée, déterminer des vitesses verticales à mieux que le mm/an demeure un défi qui relève du domaine la recherche en Géodésie. La synergie de la marégraphie et de la géodésie spatiale se heurte à des incertitudes méthodologiques, mais également à des problèmes pratiques d'ordre logistique, liés à la multiplicité des techniques et des intervenants.

Sans un système comme SONEL, chacun se heurtera à un travail délicat et pénible de collecte des données éparées et hétérogènes relatives à chaque étape de la chaîne de mesure, ce qui demandera de la part du "collecteur" un effort non négligeable de compréhension et de traduction. SONEL est nécessaire pour construire des résultats cohérents et d'avoir une idée précise de leur qualité.

2. Fédération de réseaux d'observation

Le réseau d'observatoires de SONEL suit le concept de fédération de réseaux indépendants sous la responsabilité d'organismes partenaires. Ces derniers peuvent trouver en SONEL une diffusion et une valorisation complémentaires de leurs données, tout autant qu'un soutien scientifique et technique pour contrôler la qualité de leurs observatoires et, le cas échéant, contribuer à leur mise à niveau. Les réseaux opérationnels français sur lesquels SONEL s'appuie sont :

- RONIM³, réseau de marégraphes côtiers permanents développé par le SHOM, équipés de capteurs et de centrales d'acquisition modernes. Il comprend aujourd'hui 20 stations et devrait en compter une trentaine à terme.
- RGP/IGS, la composante à vocation plus scientifique du réseau GPS permanent (RGP) développé par l'IGN, en particulier les stations d'Ajaccio, de Brest et de Marseille, mais d'autres sont d'ores et déjà envisagées, Saint Jean-de-Luz par exemple.

D'autres réseaux sont prévus et devraient être intégrés à terme. Il s'agit de :

- DORIS⁴, réseau de balises d'orbitographie et de positionnement à couverture mondiale, développé et maintenu par l'IGN, en partenariat avec le CNES.
- ROSAME⁵, la composante côtière du réseau de marégraphes implantés par le laboratoire LEGOS avec le concours de l'IPV (ex-IFRTP) et de l'INSU, au nombre de 4 aujourd'hui.
- Le réseau de stations GPS du CETMEF (Ministère de l'Équipement).
- Le réseau de marégraphes du service maritime de Charente (5 marégraphes prévus).

Deux types de stations d'observation sont distingués suivant l'objectif scientifique premier :

- des stations axées sur l'évolution à long terme du niveau des mers. Il s'agit de marégraphes ayant une longue histoire d'enregistrement du niveau de la mer. La géodésie spatiale fournirait, en l'espace de 10-20 ans, des vitesses verticales avec une précision d'au moins le mm/an grâce à une surveillance continue.
- des stations orientées vers l'étude de la variabilité du niveau de la mer et la comparaison avec l'altimétrie spatiale. Elles requièrent des marégraphes modernes – acquisition et échange des données – et des instruments de géodésie spatiale, en fonctionnement permanent durant les missions d'altimétrie spatiale (Jason-1...).

³ Réseau d'Observation du Niveau de la Mer

⁴ Détermination d'Orbite et Radio-positionnement Intégrés par Satellite

⁵ Réseau d'Observation Sub-antarctique et Antarctique du niveau de la Mer

Dans les deux cas, l'originalité du protocole expérimental réside dans la synergie des observations de marégraphie et de géodésie spatiale. Cette synergie se réalise en pratique par le rattachement géodésique des repères matériels du marégraphe et de la station de géodésie spatiale. C'est un élément clé, trop souvent négligé malheureusement, intimement lié au calage précis ou étalonnage du marégraphe. L'accès au repère de référence terrestre international se fait ensuite par mesures et analyses combinées des solutions de géodésie spatiale, constituées en réseaux de stations multi-techniques co-localisées.

3. Grandeurs mesurées

Les principaux éléments d'observation de SONEL sont :

- des mesures de hauteur d'eau de marégraphes côtiers permanents,
- des mesures de stations GPS permanentes proches de marégraphes, mais aussi à l'intérieur des terres lorsque celles-ci contribuent à la réalisation du système de référence terrestre,
- des rattachements géodésiques entre repères de marée et repères GPS. Il s'agit souvent de différences de coordonnées ou de dénivelés issus de nivellement de précision ou de GPS.
- des mesures d'étalonnage des marégraphes, mesures indépendantes du marégraphe avec sondes étalons lumineuses ou acoustiques.

Ces éléments de mesure doivent permettre la construction de séries temporelles de niveaux moyens de la mer exprimés à la fois par rapport à la côte et dans un système de référence terrestre géocentrique. Ils permettront d'estimer les variations relatives et «absolues» du niveau de la mer, d'évaluer les mouvements verticaux de la croûte terrestre sur laquelle reposent les marégraphes, et par suite de comprendre les processus en jeu et prépondérants dans chaque site (subsidence ou élévation réelle du niveau marin).

SONEL doit également apporter les données documentaires nécessaires et indispensables pour tirer le meilleur parti possible des mesures et des produits du service. L'interprétation des signaux de marégraphie et de géodésie spatiale à long terme nécessite de plus en plus le croisement avec d'autres sources de données, en particulier météorologiques, hydrologiques et gravimétriques.

III. L'infrastructure SONEL

SONEL prévoit la mise en place des composantes suivantes [Wöppelmann et al, 1999] :

- Un réseau d'observatoires côtiers, ou fédération de réseaux
- Un système de collecte des données
- Des unités d'analyse de données et de préparation des produits
- Un système d'archivage et de diffusion des données
- Un groupe de coordination
- Une activité de formation et d'assistance aux partenaires

Outre la dernière composante, toutes les autres sont actives et se trouvent à différents niveaux de développement aujourd'hui, développement qu'il convient de poursuivre. Une chronologie brièvement commentée des événements marquants le développement de SONEL est donnée ci-dessous :

Automne 2001:

- Proposition d'implantation du centre de données SONEL au CLDG (Université de La Rochelle).
- Aménagements salles machines et bureau à Chizé, partenariat CNRS
- Installations matérielle et logicielle à Chizé du serveur de données SONEL.

Hiver 2001/2002

- Mise en place des routages et adresses des machines sur Internet, réservation nom de domaine
- Réunion SONEL au SHOM, Brest. Spécifications techniques du serveur SONEL
- Demande de reconnaissance de SONEL comme O.R.E.
- Validation interne des procédures automatiques de collecte et de mise à disposition des données.
- Début des collectes journalières des observations GPS de plus de 120 stations GPS dans le monde.

Printemps 2002:

- Début des collectes de données "historiques" GPS.
- Annonce du serveur *ftp.sonel.org* comme opérationnel
- Réunion SONEL au LEGOS, Toulouse. Définition des standards et des protocoles de collectes et de diffusion des niveaux marins en France
- Développement d'une maquette du serveur SONEL (<http://www.sonel.org>)

Eté 2002:

- Installation des outils d'analyse des mesures et résultats GPS (GAMIT et CATREF).
- Définition des stratégies d'analyses GPS en réseau mondial.
- Début des calculs quotidiens GPS et des combinaisons hebdomadaires.

Hiver 2002/2003:

- Annonce dans l'IGS du centre de calculs GPS opérationnel
- Accord de la direction de l'EPSHOM pour déclencher la phase pilote d'évaluation du service en donnant accès aux données horaires des marégraphes numériques de leur réseau RONIM sur SONEL.

Le point marquant de 2003 est probablement la mise à disposition des données horaires de marégraphie du réseau RONIM à travers SONEL, en temps très peu différé, une semaine après leur observation pour les données brutes. Ainsi, malgré une absence de la France dans le réseau européen du niveau de la mer ESEAS remarquée par les rapporteurs de la Commission Européenne, la France se place parmi les premiers pays, avec le Royaume-Uni, à fournir un tel service. La malheureuse expérience de ESEAS souligne l'urgence de trouver un cadre légitime à SONEL, cadre de légitimité et de reconnaissance qui lui permettrait de répondre aux appels d'offre. Elle souligne également le besoin de pérenniser l'infrastructure de recherche qui se construit autour de l'observation *in situ* du niveau marin.

De l'expérience GPS acquise à ce jour, des calculs à l'échelle globale semblent indispensables pour résoudre les questions de réalisation et de stabilité à long terme du repère de référence terrestre dans les solutions GPS. C'est pourquoi l'échelle de la composante GPS de SONEL est à présent mondiale : près de 150 stations sont aujourd'hui collectées, traitées et mises à disposition de la communauté internationale dans le cadre du projet pilote TIGA du service international GPS pour la géodynamique. Elle correspond à la composante mondiale de SONEL, entrevue à l'origine du projet SONEL, mais intégrée dès à présent compte tenu de l'évolution rapide du contexte international.

Conclusions

L'acquisition de données d'observation est à la base de tout travail de recherche. Les progrès dans la connaissance des variations absolues du niveau de la mer n'échappent pas à cette exigence. Par ailleurs, il convient de remarquer que l'océan est un milieu turbulent avec des modes de fluctuations lents, de la dizaine d'années au siècle. Imparfaitement modélisé, une observation en continu sur une longue période est par conséquent indispensable pour décrire son état et prédire son comportement. Les marégraphes conservent d'autant leur intérêt scientifique qu'ils constituent les seuls témoins directs des variations du niveau marin des deux derniers siècles, et le lien vers l'avenir. Par ailleurs, les marégraphes couplés aux stations de géodésie spatiale permettent de porter un regard détaillé sur les processus physiques qui siègent à la côte, souvent plus complexes qu'au large, la marée en est un exemple.

Dans ce contexte d'incertitude, la constitution d'une banque de données et d'archivage de toutes les mesures et métadonnées pertinentes semble essentielle. Cela comprend bien sûr les mesures GPS, mais également les mesures de marégraphie ou de rattachement par nivellement, ainsi que toutes les données complémentaires qui permettraient de mieux comprendre les signaux géophysiques. L'idée est d'archiver les mesures aussi rigoureusement que possible pour les traiter, ou les retraiter, dès que les phénomènes qui affectent la composante verticale du GPS seront mieux maîtrisés. Cette démarche n'est pas originale, mais aussi modeste puisse-t-elle paraître, elle s'est souvent révélée déterminante.

Références

Altamimi Z., P.Sillard and C. Boucher [2003]: « ITRF2000 : A new release of the International Terrestrial Reference Frame for Earth science applications ». *J. Geophys. Research*, 107, B10.

Bouligand R. et P-A. Pirazzoli [1999] : « Les surcotes et les décotes marines à Brest, étude statistique et évolution ». *Oceanologica Acta* (1999) 22, 2, pp. 153-166.

Cabanes C., A. Cazenave and C. Le Provost : « Sea level rise during the past 40 years determined from satellite and in situ observations ». *Science*, Volume 294, Issue 5543, 26 October 2001.

COI [1997] : « Global Sea Level Observing System (GLOSS): Implementation Plan – 1997 ». Commission Intergouvernementale Oceanographique de l'UNESCO, Technical Series 50

IPCC [2001] : « Climate Change 2001: The Scientific Basis », Contribution of Working Group 1 to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Editors J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden and D. Xiaosu, Cambridge University Press, 944 pp

Neilan R.E., P.A. Van Scoy and P. L. Woodworth, eds [1997] : « Workshop on Methods for Monitoring Sea Level ». IGS Workshop Proceedings, Pasadena, CA, March 17-18, 1997

Wöppelmann G., S.Allain, C.Boucher, L.Daniel et B. [1999] : « Présentation du Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales – SONEL ». Rapport SHOM-IGN, Mai 1999, 40 pp.

Woodworth P.L. [2003] : « Some comments on the long sea level records from the Northern Mediterranean ». *Journal of Coastal Research*, 19, pp. 212-217.

Zerbini S., B. Richter, M. Negusini, C. Romagnoli, D. Simon, F. Domenichini and W. Schwahn [2001] « Height and gravity variations by continuous GPS, gravity and environmental parameter observations in the southern Po Plain, near Bologna, Italy », *Earth and Planetary Science Letters*, 192, 3, pp 267-279.