



HAL
open science

Subsidence et élévation du niveau marin dans les villes côtières : apports de l'interférométrie radar satellitaire

Daniel Raucoules, Gonéri Le Cozannet, Marcello de Michele, Guy Woppelmann, Anny Cazenave

► To cite this version:

Daniel Raucoules, Gonéri Le Cozannet, Marcello de Michele, Guy Woppelmann, Anny Cazenave. Subsidence et élévation du niveau marin dans les villes côtières : apports de l'interférométrie radar satellitaire. *Géosciences*, 2013, 17, pp.46-53. hal-01062234

HAL Id: hal-01062234

<https://brgm.hal.science/hal-01062234>

Submitted on 9 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Depuis la fin du XIX^e siècle, le changement climatique a entraîné une élévation du niveau marin global de l'ordre de 20 cm. Localement, la valeur observée peut cependant s'écarter sensiblement de cette tendance globale, non seulement parce que l'élévation du niveau marin n'est pas uniforme, mais aussi en raison des mouvements verticaux du sol qui peuvent affecter la zone côtière. Cet article présente trois exemples de subsidences dans trois zones côtières urbaines à Thessalonique (Grèce), Alexandrie (Égypte) et Manille (Philippines).

Comme plusieurs mégapoles côtières d'Asie, Manille est régulièrement affectée par des cyclones et des inondations. Elle est considérée comme particulièrement vulnérable à l'élévation future du niveau marin et aux effets du changement climatique.

Like several Asian coastal cities, Manila (Philippines) is regularly affected by cyclones and surges. This city is considered to be particularly vulnerable to future sea level rise and to the effects of climate change.

© Deposit Photos



Subsidence et élévation du niveau marin dans les villes côtières : apports de l'interférométrie radar satellitaire



Daniel Raucoules

BRGM,
DIRECTION RISQUES ET PRÉVENTION
d.raucoules@brgm.fr



Gonéri Le Cozannet

BRGM,
DIRECTION RISQUES ET PRÉVENTION
G.LeCozannet@brgm.fr



Marcello De Michele

BRGM,
DIRECTION RISQUES ET PRÉVENTION
m.demichele@brgm.fr



Guy Wöppelmann

UNIVERSITÉ DE LA ROCHELLE
gwoppelmann@univ-lr.fr



Anny Cazenave

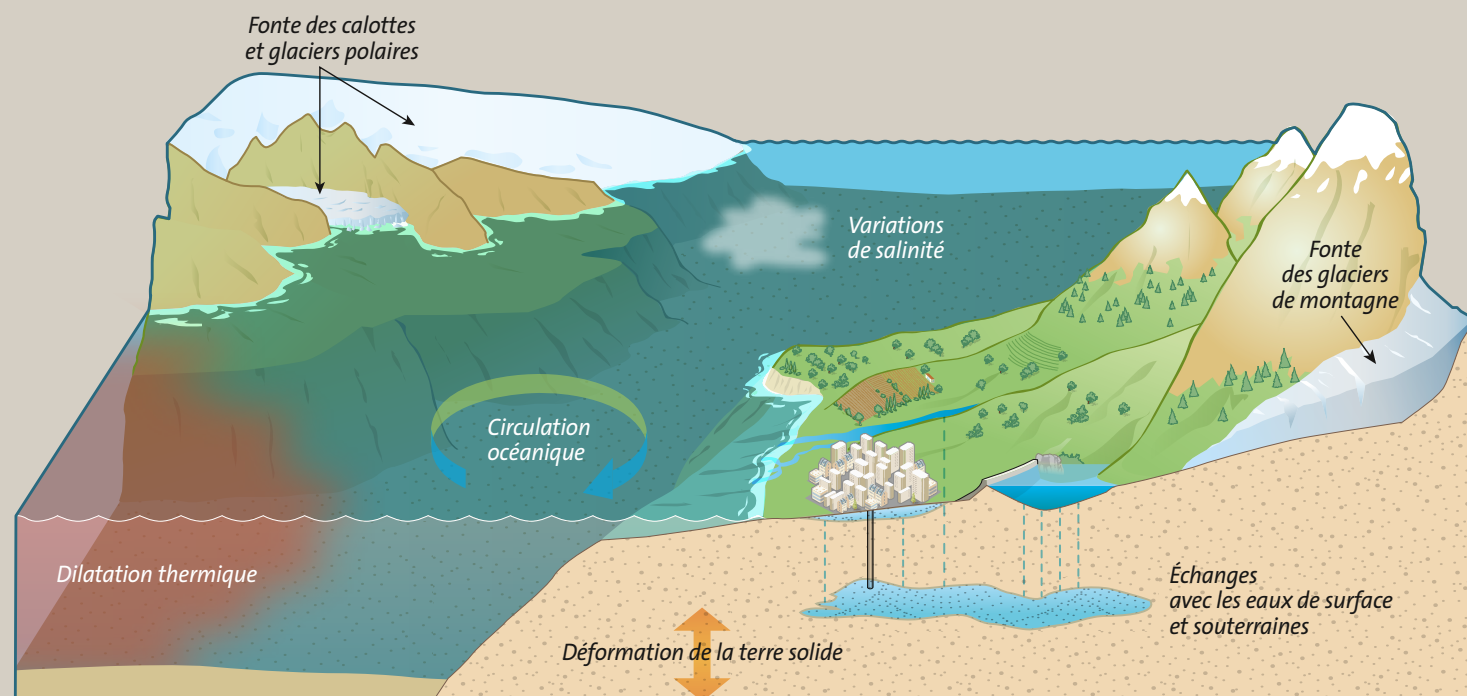
LABORATOIRE D'ÉTUDES
EN GÉOPHYSIQUE ET OCÉANOGRAPHIE
SPATIALES (LEGOS, TOULOUSE)
anny.cazenave@legos.obs-mip.fr

Depuis la fin du XIX^e siècle, le niveau marin global s'est élevé de 20 cm à l'échelle globale. Ce phénomène est bien expliqué par les effets du changement climatique d'origine anthropique : dilatation thermique des océans, fonte des glaciers de montagne et des calottes polaires (encadré p. 48). Or, l'élévation du niveau marin n'est pas uniforme. Au contraire, elle présente une variabilité régionale importante (figure 1), due au réchauffement hétérogène de l'océan d'une part, et aux déformations de la terre solide induites par des redistributions de masses passées et actuelles d'autre part. Parmi ces derniers effets, le plus connu est l'ajustement isostatique postglaciaire qui est une réponse des masses terrestres à la fonte des calottes du dernier maximum glaciaire affectant notamment la Scandinavie et le Canada. Enfin, des modélisations montrent que le géoïde terrestre se déforme actuellement en réponse à la fonte des glaces actuelles et aux redistributions des masses qui en résultent [Stammer *et al.* (2013)].

“L'élévation du niveau marin présente une variabilité régionale importante.”

Les variations du niveau marin dues aux mouvements du sol

À ces variations régionales du niveau marin peuvent s'ajouter des mouvements du sol d'origines diverses, susceptibles de modifier l'évolution du niveau relatif de



“ Dans plusieurs métropoles côtières, on observe des phénomènes de subsidence de plusieurs centimètres par an. ”

la mer, c'est-à-dire par rapport à la côte : tectonique, compaction de sédiments, extractions d'eaux souterraines, de gaz ou de pétrole, etc. Dans des sites emblématiques tels que plusieurs métropoles en expansion du sud-est asiatique (Bangkok, Jakarta, Shanghai, etc.), on observe des phénomènes de subsidence (affaissement du sol) de plusieurs centimètres par an. Ces processus peuvent être très localisés et dominant parfois largement les effets des variations du niveau marin d'origine climatique. Cependant, leur évolution est la plupart du temps difficile à anticiper. Pour mieux les évaluer, il faut donc avoir recours à des observations géodésiques adaptées.

Un outil de mesure : l'interférométrie radar satellitaire

Les variations du niveau marin relativement à la côte peuvent être mesurées par un marégraphe. Leurs mesures permettent d'obtenir une évolution du niveau marin local, c'est-à-dire prenant en compte à la fois les

variations du niveau marin d'origine climatique et le mouvement propre de l'instrument. Pour évaluer la contribution de chacun des phénomènes, d'autres mesures réalisées par d'autres outils géodésiques peuvent être exploitées : GPS permanents, campagnes de nivellement, etc. Cependant, ces mesures sont de natures différentes et couvrent des périodes distinctes : les marégraphe sont en place, parfois depuis plus d'un siècle, et effectuent leurs mesures plus ou moins continûment, alors que les outils géodésiques sont soit récents (exemple : GPS permanents) soit n'ont fourni que des mesures occasionnelles (exemple : nivellement).

Parmi les outils géodésiques complémentaires qui peuvent être utilisés, l'interférométrie radar satellitaire (InSAR) présente un intérêt particulier, car elle offre la possibilité de cartographier un éventuel champ de déformations. Cette technique utilise un signal radar émis par le satellite et rétrodiffusé par le sol : la mesure de la différence de phase du signal entre deux passages du satellite permet, dans de bonnes conditions, d'estimer des mouvements du sol de l'ordre du millimètre par an à quelques centimètres par an (suivant les données et les méthodes de traitement utilisées). Dans les exemples ci-dessous, nous résumons les résultats d'études récentes sur les agglomérations de Thessalonique (Grèce), Alexandrie (Égypte) et Manille (Philippines) qui illustrent la variété des processus de surrection ou de subsidence possibles dans les zones côtières.

“ L'interférométrie radar satellitaire permet d'estimer des mouvements du sol de l'ordre du millimètre à quelques centimètres par an. ”

▲ **Figure 1 : Causes de l'élévation du niveau marin à l'échelle globale.**

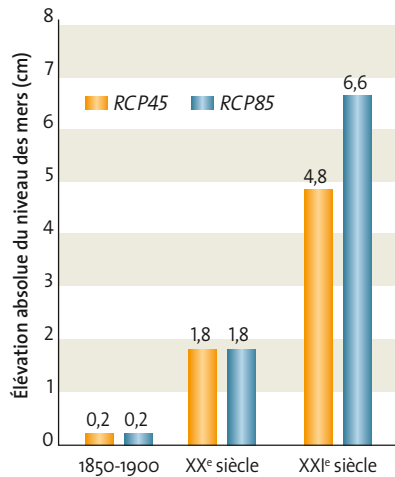
Figure 1: Causes behind the rise in sea level on a global scale.

© BRGM.

► ESTIMATION DE LA CONTRIBUTION DES CALOTTES GLACIAIRES À LA HAUSSE GLOBALE DU NIVEAU DES MERS

David Salas y Mélia – CNRM-GAME, UMR 3589 Météo-France/CNRS – david.salas@meteo.fr
Mikhaïl Geyer – CNRM-GAME, UMR 3589 Météo-France/CNRS – mikhaïl.geyer@meteo.fr

Il est possible de fournir des estimations réalistes de la contribution future des calottes groenlandaise et antarctique à la hausse globale du niveau des mers à l'horizon 2100 en ne comptant que des changements de



▲ Contribution de la calotte groenlandaise à l'élévation du niveau des mers pour 1850-1900, le XX^e et le XXI^e siècle.

Contribution of the Greenland ice sheet (cm) to global sea level rise for 1850-1900 and the 20th and 21st centuries.

© Météo-France/CNRS

bilan de masse, c'est-à-dire le bilan annuel net de l'accumulation neigeuse, de la fonte et de la sublimation à la surface. Pour des échéances plus éloignées, il conviendrait de considérer la dynamique et la fonte basale de la calotte, par exemple en utilisant un modèle prenant en compte l'ensemble de la calotte.

La contribution future de la calotte groenlandaise au niveau marin a été estimée dans le cadre du projet ANR/CECILE⁽¹⁾. Pour cela, des simulations climatiques réalisées avec le modèle CNRM-CM5.1⁽²⁾ ont été utilisées sur la période 1850-2100. Ce modèle a une résolution horizontale d'environ 150 km et deux scénarios RCP4.5⁽³⁾ (médian en termes d'émissions en gaz à effet de serre et aérosols)

(1) www.anr-cecile.fr

(2) Le modèle de climat couplé global utilisé et développé par Météo-France, en association avec le Cerfacs (<http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article126&lang=fr>). Référence : Voldoire, A., et al. (2013) - The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation, *Climate Dynamics*, vol. 40(9-10): 2091-2121, DOI:10.1007/s00382-011-1259-y.

(3) Les RCP (Representative Concentration Pathways) sont les nouveaux scénarios futurs de référence. Dans leur dénomination, le nombre (4,5, 8,5...) correspond à un changement du bilan radiatif de la planète entre 1850 et 2100 (en Watt/m²), le bilan radiatif désignant la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge émis au sommet de l'atmosphère. Le RCP8.5 est le scénario le plus sévère, tandis que le RCP4.5 est considéré comme « médian » (voir www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/).

et RCP8.5 (fort) ont été envisagés pour 2006-2100. Le bilan de masse de la calotte groenlandaise a été évalué avec une résolution horizontale de 15 km, ce qui permet de représenter correctement les fortes variations spatiales, notamment près du bord de la calotte. Pour cela, une technique de descente d'échelle a été développée. Elle s'appuie à la fois sur des bilans de masse directement issus de CNRM-CM5.1 et sur des simulations du manteau neigeux utilisant le modèle CROCUS forcé par des sorties atmosphériques de CNRM-CM5.1.

Pour le climat actuel, le taux d'élévation du niveau des mers a été estimé à 0,27 mm/an, ce qui est légèrement inférieur aux observations réalisées pour la fin du XX^e siècle. La contribution totale estimée de la fonte des glaces du Groenland à l'élévation du niveau marin au XXI^e siècle est respectivement d'environ 5 cm (RCP4.5) et 6,5 cm (RCP8.5). Dans le cas du scénario RCP8.5, la fonte devrait s'accélérer très rapidement après le XXI^e siècle. Ce phénomène, qui se produit sous l'effet du changement climatique, est amplifié par la diminution d'altitude de la calotte, ce qui accentue le réchauffement des températures au Groenland. ■



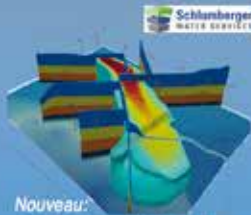
▲ Beaucoup d'incertitudes demeurent quant à l'élévation future du niveau marin, notamment en raison de la complexité des processus dynamiques de fonte des marges côtières des calottes polaires (ici en Antarctique).

Considerable uncertainties remain as to the future rise in sea level, notably due to the complexity of the dynamic melting processes affecting the coastal margins of polar icecaps (here, in Antarctica). © Depositphotos.

La fiabilité de vos diagnostics environnementaux dépend de vos outils !



CTD-Diver



Nouveau: Logiciel Visual Modflow Flex



Humidimètres sols et matériaux



Stations météo GPRS



Tarières & Carottiers



Solutions technologiques pour l'environnement

SDEC France - ZI de la Gare - BP 27 Tauxigny - 37310 Reignac sur Indre - France
Tel: 02 47 94 10 00 - Fax: 02 47 94 17 13 - e-mail: info@sdec-france.com

Découvrez nos équipements sur: www.sdec-france.com

Exemples d'études

Thessalonique

La ville de Thessalonique en Grèce compte un peu moins d'un million d'habitants. Depuis les années 1960, une partie de la plaine côtière de la ville est affectée par une subsidence rapide (plusieurs centimètres par an). L'une des conséquences est un recul du trait de côte atteignant jusqu'à 2 km par endroits. Les causes de cette subsidence sont complexes : elles impliquent

non seulement le pompage d'eaux souterraines, mais aussi d'autres processus, tels que des tassements de sédiments profonds sous les effets de la charge [Stiros (2001)]. Sur ce site, l'interférométrie radar a permis de confirmer l'existence de deux zones en subsidence (secteur de Kalochori avec des taux de plus 5 cm par an), mais aussi de révéler deux nouvelles zones affectées par ce même processus, en particulier à proximité de l'aéroport de Thessalonique avec des taux atteignant 2 cm par an (figure 2).

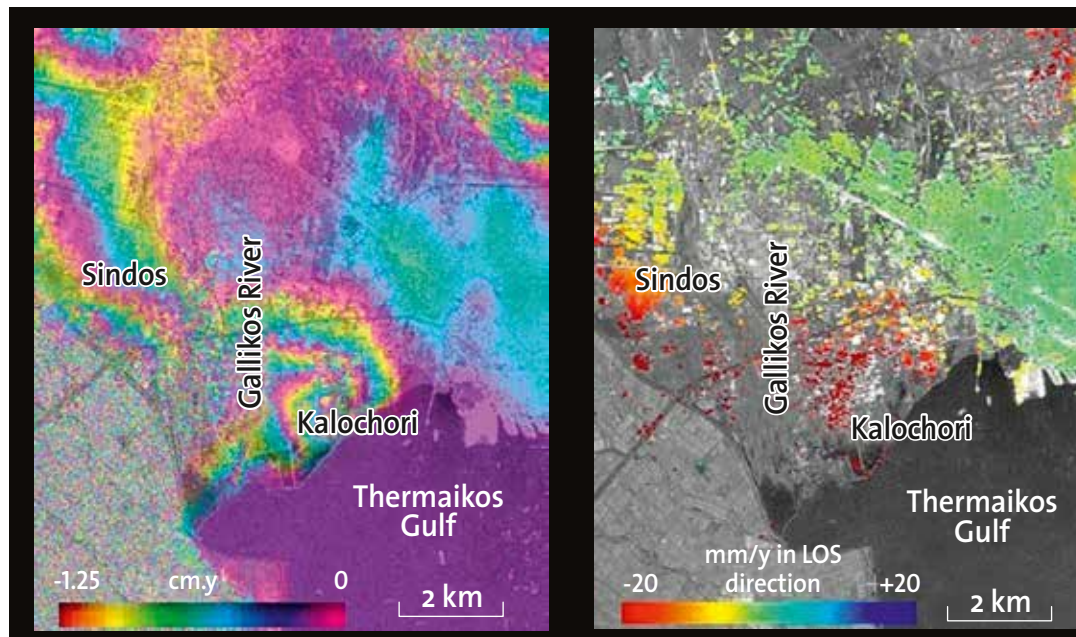


Fig. 2 : Déformation sur Kalochori vue par interférométrie radar conventionnelle (à gauche) et par une technique InSAR avancée (PSInSARTM, à droite).

Fig. 2: Deformation around Kalochori observed via conventional radar interferometry (left) and an advanced InSAR technique (right, PSInSARTM). D'après Raucooules et al. (2008).

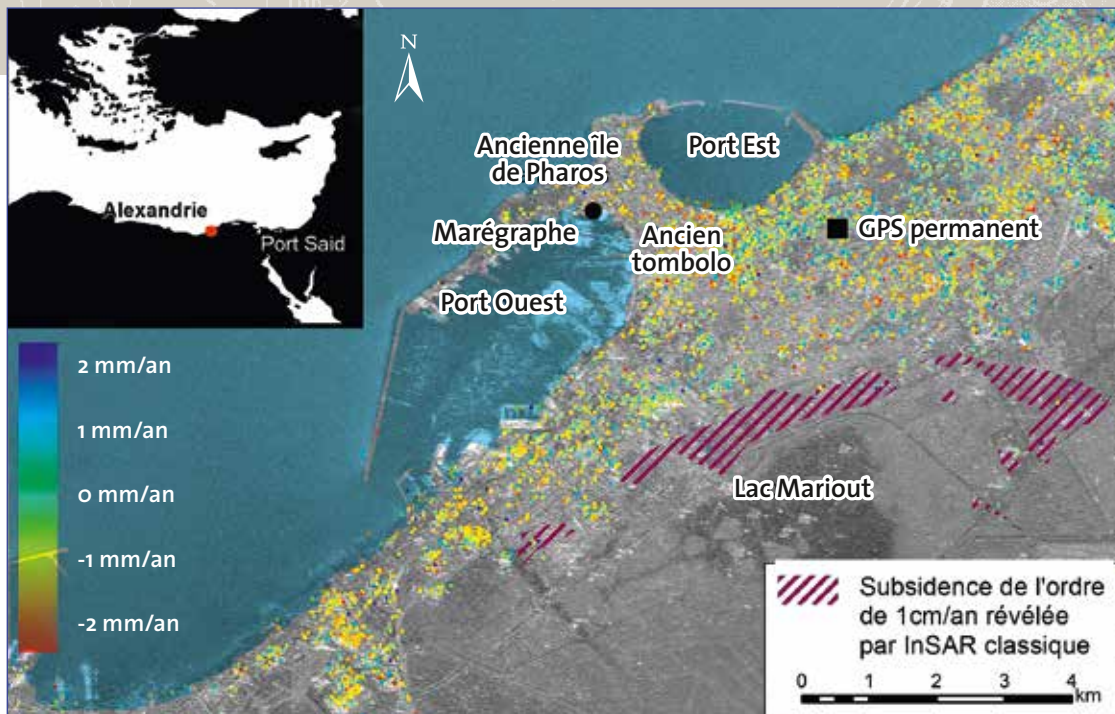


Fig. 3 : Déformation sur Alexandrie vue par interférométrie sur points persistants à partir de données provenant du satellite EnvisAT sur la période 2002-2010. Les positions du marégraphe et du point GPS sont indiquées.

Fig. 3: Deformation across Alexandria observed via Interferometry over persistent scatterers using data from the EnvisAT satellite for the interval 2002 to 2010. The positions of the tide gauge and the GPS point are indicated.
D'après Wöppelman et al. (2013).

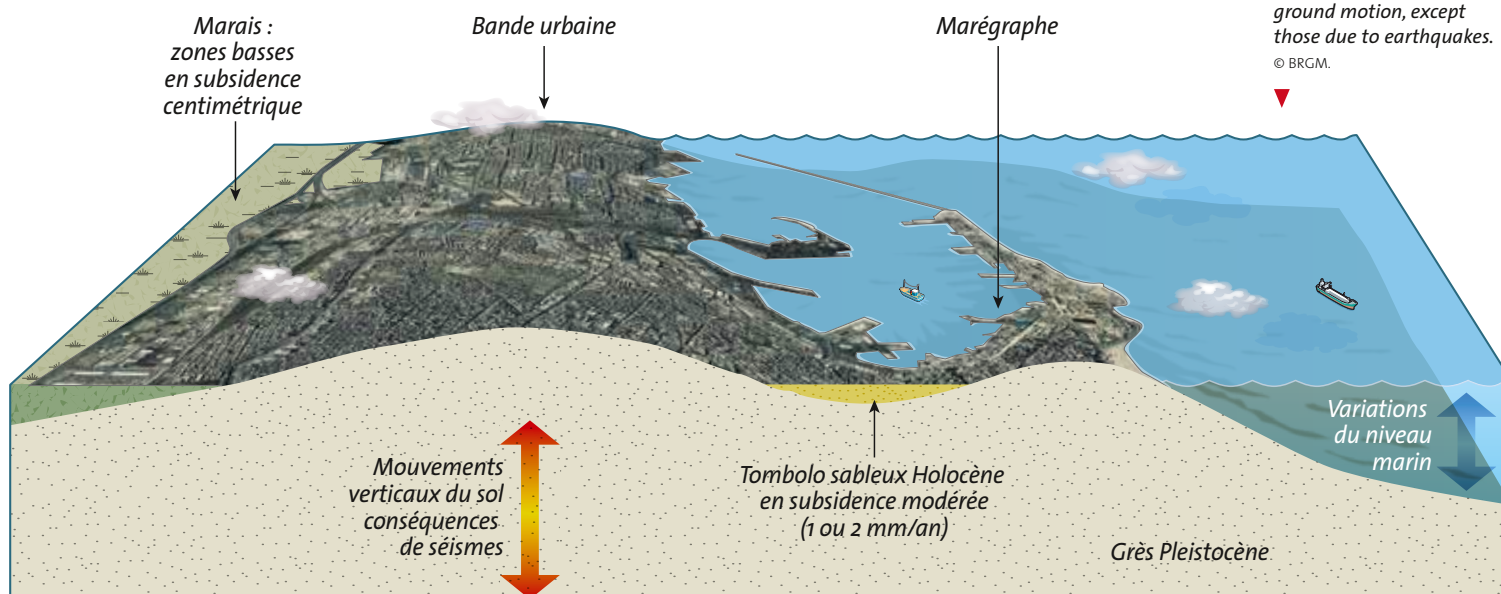
Alexandrie

La ville d'Alexandrie (Égypte), qui compte plus de 4 millions d'habitants, est parfois considérée comme une ville particulièrement vulnérable aux effets combinés de l'élévation du niveau marin et de subsidences côtières. En réalité, l'analyse de données marégraphiques, GPS et InSAR [Wöppelmann et al. (2013)] montre que la ville a été pour l'essentiel stable au cours des dernières vingt années, sauf dans certaines zones localisées où les dépôts sédimentaires récents (Holocène) sont

plus épais (figures 3 et 4). Cependant, à des échelles de temps plus longues, les vestiges archéologiques submergés indiquent que la ville a pu s'enfoncer de plusieurs mètres à la suite de séismes. Par ailleurs, si la ville d'Alexandrie, située à la marge occidentale du delta du Nil, a été relativement épargnée par les subsidences côtières au cours des dernières décennies, ce n'est pas le cas dans l'est du delta, où les subsidences peuvent atteindre 5 mm/an dans la région de Port Saïd.

Fig. 4 : Schéma du contexte de déformations du sol à Alexandrie : si les zones marécageuses sont affectées par des mouvements du sol centimétriques, la ville elle-même et la donnée marégraphique sont peu affectées par des mouvements du sol, sauf à la suite de séismes.

Fig. 4: A schematic representation of the ground motion context in Alexandria: while wetlands are affected by subsidence on the order of a few cm/yr, the city itself and the tide gauge data are affected little by ground motion, except those due to earthquakes.
© BRGM.



Manille

Manille (Philippines) est une métropole côtière de plus de 16 millions d'habitants. L'interférométrie radar révèle des phénomènes de subsidence dont les vitesses peuvent être de l'ordre de plusieurs centimètres par an (figure 5). Ces mouvements, dont l'évolution temporelle, la position et l'étendue spatiales varient, sont principalement la conséquence de pompages d'eaux souterraines. Outre les éventuels problèmes sur le bâti et pour l'évacuation des eaux suite aux inondations, ces mouvements ont une conséquence importante et inattendue : ils affectent un marégraphe dont les mesures sont utilisées pour estimer les variations globales du niveau marin pour la période 1900-1992.

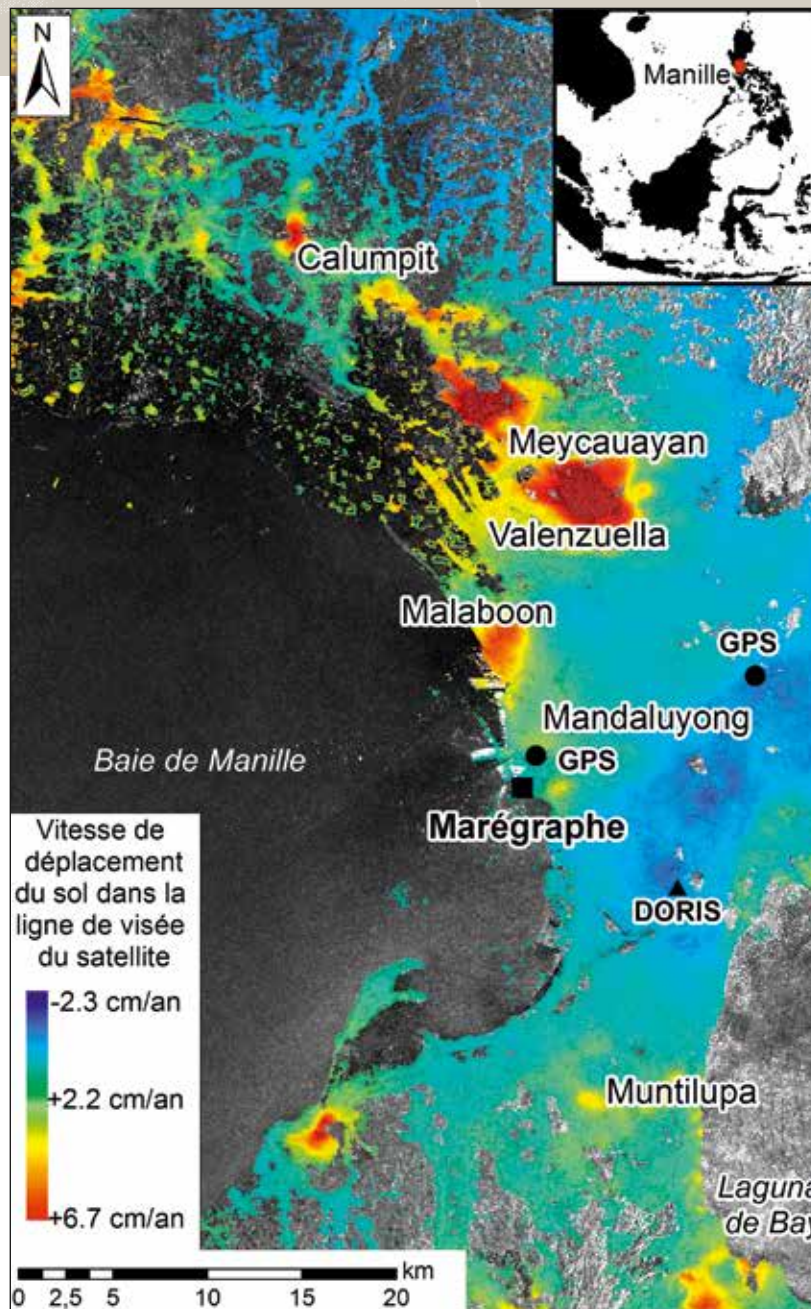
Séparer la contribution de chacun des phénomènes

Les mesures du niveau marin par les marégraphes incluent à la fois les variations régionales du niveau marin et d'éventuels mouvements du sol. La technique InSAR permet, dans de bonnes conditions, d'évaluer la part de chacun des phénomènes, et surtout d'analyser la variabilité spatiale et temporelle des éventuels mouvements locaux du sol. Pourquoi est-il si important de bien comprendre la part de chacun des phénomènes ?

Tout d'abord, pour des problématiques de gestion des risques : de manière évidente, les mesures de remédiation ou de prévention des risques associés à ces différents phénomènes ne sont pas les mêmes. Ainsi, pour ce qui concerne les risques induits par des pompages excessifs des eaux souterraines, il est toujours possible de recharger les aquifères artificiellement pour limiter la subsidence. Cette approche a été utilisée à Shanghai à partir des années 1960, après que la ville s'est enfoncée de 1,8 mètre en moyenne entre 1921 et 1965 [Wang *et al.*, (2012)]. Au contraire, d'autres mesures comme la relocalisation d'enjeux ou le rehaussement des défenses peuvent être envisagées pour s'adapter à des variations plus lentes du niveau marin (encadré p.52). C'est le cas de certains tassements sédimentaires, mais aussi de l'élévation du niveau marin d'origine climatique, dont les impacts ne seront vraisemblablement perceptibles que dans plusieurs dizaines d'années.

Il existe une seconde motivation pour mieux séparer la part de chacun des processus conduisant à modifier le niveau marin relatif au niveau des marégraphes.

Avant l'avènement de satellites altimétriques adaptés (notamment Topex-Poseidon en 1992), la seule information disponible pour mesurer les variations du niveau marin sont les marégraphes. Or, les évaluations des contributions des glaciers, des calottes polaires et de la dilatation thermique des océans ne sont pas parfaitement en accord avec les observations des marégraphes. L'une des pistes de recherche pour résoudre cette énigme consiste à étudier le contexte de déformations du sol dans le voisinage des marégraphes les plus importants. Pour cela, il existe plusieurs techniques de géodésie, parmi lesquelles l'InSAR.



▲ Fig. 5 : Déformation du sol sur l'agglomération de Manille pendant la période 2003-2010 vue par interférométrie radar. Données issues du satellite EnvisAT.

Fig. 5: Ground deformation across the urban area of Manilla for the interval 2003 to 2010 observed via radar interferometry of data from the EnvisAT satellite.

D'après Raucoles *et al.* (2013).

► ADAPTATION DES STRUCTURES CÔTIÈRES À L'ÉLÉVATION DU NIVEAU MARIN

Philippe Sergent – Directeur scientifique – CETMEF (Centre d'études techniques maritimes et fluviales) – philippe.sergent@developpement-durable.gouv.fr

Dans le cadre du programme Gestion et Impact du Changement Climatique (GICC – 2008) le projet SAO POLO⁽¹⁾ a étudié l'adaptation des structures côtières à l'élévation du niveau marin en lien avec l'agglomération Havraise⁽²⁾.

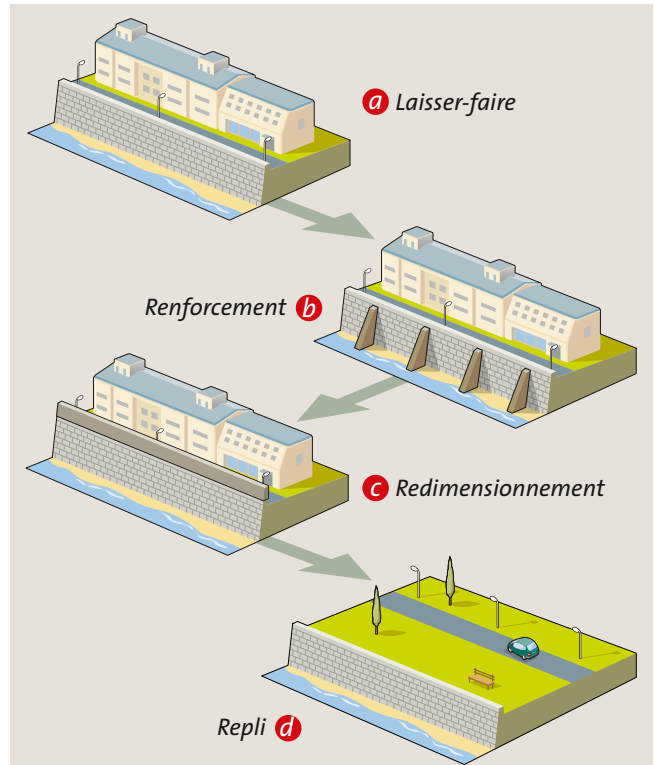
Avec l'élévation du niveau marin, les digues côtières seront exposées à des vagues plus fortes, notamment les structures construites en faibles profondeurs où, en raison du déferlement bathymétrique, l'amplitude maximale des vagues est proportionnelle à la profondeur : si la profondeur double avec l'élévation du niveau marin, l'amplitude maximale des vagues doublera aussi.

Si le niveau marin augmente d'un mètre, les ouvrages en faibles profondeurs devront être rehaussés en première approche de deux à trois mètres pour conserver leur efficacité. Les dommages augmenteront aussi de façon non négligeable et le poids des blocs de la carapace devra souvent être doublé.

Schématiquement, avec l'augmentation progressive des dommages, le gestionnaire adoptera un des scénarios suivants : a) laisser-faire ou réparer l'ouvrage à l'identique ; b) le renforcer ; c) changer ses dimensions ; d) effectuer un repli stratégique (figure 1).

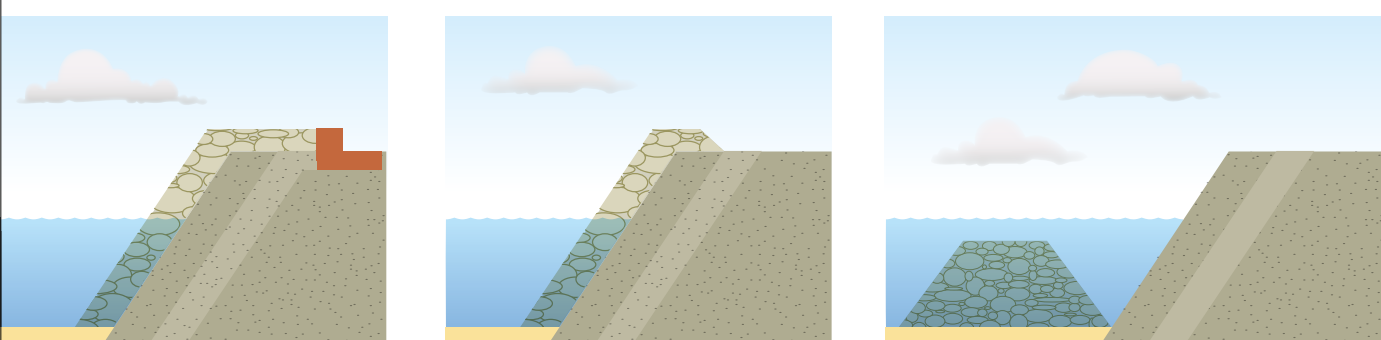
Trois axes se dégagent pour renforcer les structures (figure 2) : limiter le franchissement (par exemple, en modifiant le mur de couronnement) et/ou améliorer la stabilité de la carapace (en ajoutant une couche d'encrochements supplémentaire ou en adoucissant la pente) et/ou réduire les sollicitations extérieures comme la houle (en implantant un ouvrage détaché ou en assurant un rechargement de sable).

Il s'avère que l'ajout d'un bécuet est une solution très efficace pour les ouvrages imperméables. Cette solution doit souvent être complétée par une couche supplémentaire d'encrochements pour les ouvrages perméables. Le bassin de déversement est aussi une solution prometteuse. L'approche coût-bénéfice appliquée à la ville du Havre a montré que la solution du renforcement ne deviendra économiquement justifiée que si le niveau marin augmente d'un mètre. Le redimensionnement ou le repli stratégique quant à eux ne peuvent être envisagés que pour des niveaux plus importants (au-delà de deux mètres d'élévation du niveau marin). ■



▲ Fig. 1 : Stratégies d'adaptation à l'élévation du niveau marin. Fig. 1: Strategies of adaptation to mean sea level rise. © CETMEF.

(1) SAO POLO (Stratégies d'Adaptation des Ouvrages de Protection marine ou des modes d'Occupation du Littoral vis-à-vis de la montée du niveau des mers et des Océans) – cf. Guide Méthodologique GICC N° G.90006812 – SAOPOLO – Rapport final août 2012 – Coordinateur : Philippe Sergent www.gip-ecofor.org/doc/drupal/gicc/Sergent_Guide_RF_2_sept2012.pdf
 (2) Partenaires du projet : Université de Technologie de Compiègne, Université du Havre, EDF (Electricité de France), CETMEF, société Reportex, Communauté de l'agglomération Havraise et Office des risques majeurs de l'estuaire de la Seine.



▲ Fig. 2 : Options de renforcement. Fig. 2 : Reinforcement options. © CETMEF et université d'Aalborg.



Subsidence and sea level rise in coastal cities: benefits of SAR interferometry

Since the end of 19th century, sea level is rising, driven by climate change brought on by a whole spectrum of activities engaged in by man's industrialized society. This said, sea level at the coast does not strictly reproduce global trends: first, sea level is not uniform, displaying significant variability from one region to another; second, coastal zones can be affected by vertical ground motions. This article examines three examples of coastal subsidence in urban areas: Thessaloniki (Greece), Alexandria (Egypt) and Manila (Philippines), which have been monitored by means of satellite interferometry (InSAR). This technique uses the evolution of the phase of the backscattered signal between two or more satellite passes to infer ground motion displacements. In some cases, they can reveal unknown subsidence (e.g. in Thessaloniki) or provide more quantitative information about their spatial and temporal patterns (e.g. in Manila). A wide range of causes are involved in such ground motions, including groundwater extraction and sediment compaction, and, in certain instances, vertical ground motion can reach as much as several centimetres per year, hence far exceeding the climate-induced sea-level rise currently observed. In Thessaloniki, this has resulted in shoreline retreats of up to 2 km locally, and, although many other factors are involved (such as the Typhoon patterns, etc.), these may be expected to exacerbate the risks of flooding in Manila. Therefore, while the concern with adapting coastal zones to accommodate the effects of climate change is coming under increased scrutiny, it seems essential that the effects of coastal subsidence should also be factored in.

Ainsi, les deux séries temporelles marégraphiques de Manille et d'Alexandrie, du fait de leur longueur et de leur continuité remarquables, sont particulièrement importantes pour la compréhension des variations du niveau marin dans le Pacifique est et en Méditerranée orientale. Cependant, si les déformations du sol sont un problème mineur pour le marégraphe d'Alexandrie, elles corrompent les données de Manille, les rendant partiellement inexploitable [Wöppelmann *et al.* (2013); Raucoules *et al.* (2013)]. Ainsi, l'observation des déformations du sol au voisinage des marégraphes les plus importants est utile pour l'étude de l'une des conséquences les plus importantes du changement climatique : l'élévation du niveau marin.

Conclusion

Ces quelques exemples montrent que l'interférométrie radar satellitaire peut donner accès, de façon complémentaire aux mesures au sol, à une information importante et souvent mal connue : les mouvements verticaux du sol dans la zone côtière. Ces mouvements peuvent être non linéaires et s'exercer à différentes échelles spatiales et temporelles.

Il est important de pouvoir discriminer les deux composantes de l'élévation locale de la mer. Dans le cas de subsidences dues à des pompages, des mesures de remédiation sont possibles : arrêt de prélèvements, rechargement artificiel de nappes souterraines. Pour ce qui concerne des phénomènes plus lents tels que l'élévation du niveau marin d'origine climatique, les mesures d'adaptation pourront inclure, selon les cas, le rehaussement de défenses ou, lorsque c'est possible, des relocalisations.

Quoi qu'il en soit, dans le cadre de l'étude locale des variations relatives du niveau marin et de ses effets, ces processus locaux ne peuvent plus être négligés dans la mesure où ils peuvent être du même ordre de grandeur ou même supérieurs aux variations du niveau marin d'origine climatique. ■

Remerciements : Les études de Manille et d'Alexandrie ont été réalisées dans le cadre du projet ANR CECILE. Les résultats montrés en figures 2, 3 et 5 sont basés sur des données issues de satellites de l'Agence spatiale européenne (ESA, ERS, Envisat).

“
Les processus
de subsidence locale
ne peuvent plus
être négligés: ils peuvent
être du même ordre
de grandeur que
les variations
du niveau marin
d'origine climatique.”