

# La subsidence des sites côtiers en Méditerranée

par [Arthur de Graauw](#) et [Gilles Brocard](#) 20 Octobre 2023

Dans le prolongement de notre [billet du 29 avril 2022 sur Caesarea Maritima](#), dans lequel la question de la subsidence de son port était abordée, mais où la question des mouvements verticaux de la croûte terrestre était restée en suspens, nous avons procédé à un inventaire des mouvements de subsidence (vers le bas) et de surrection (vers le haut) connus dans le bassin méditerranéen, à partir de quelques publications existantes (telles que Flemming, 1978, Sivan, 2010, Pavlopoulos, 2011 et d'autres listés en fin de billet).

## De quoi s'agit-il ?

Ce qu'on appelle la subsidence relative d'une côte est l'addition de la montée de la mer depuis 18 000 ans (consécutives à la fonte des calottes polaires), appelée eustatisme, et de l'enfoncement ou du soulèvement de la surface du sol résultant de processus variés, tectoniques (déformation irréversible des roches), thermiques (changement de température des roches), flexuraux (ploiement élastique de la surface terrestre sous l'effet des charges), et de compaction des sédiments. Le résultat, pour un observateur situé à terre, est que le niveau « relatif » de la mer monte. Séparer ces composantes les unes des autres est une tâche ardue. En première approximation, on peut considérer que le plan d'eau marin est « horizontal » (à la courbure du globe près) pendant sa remontée post-glaciaire. Les mouvements de la lithosphère, positifs comme négatifs s'additionnent donc à ce mouvement du plan d'eau, engendrant des variations locales du niveau marin relatif (de Graauw 2023). Afin de déterminer la composante résultant du seul effet de la fonte des glaces, il a été proposé de mesurer les mouvements du niveau marin relatif sur un grand nombre de sites, d'en faire la moyenne, puis de calculer les écarts à cette moyenne sur chaque site. Cet exercice, initié par N.C. Flemming dans les années 1960 a depuis été peaufiné maintes fois à grand renfort de modélisations numériques, lesquelles ont été plus ou moins bien contraintes par des observations de terrain. Ces modélisations incluent notamment les déformations de la lithosphère produites par la redistribution des masses de glace et d'eau sur la terre à la fin de la glaciation, en fonction des variations connues ou estimées de la rigidité flexurale de la lithosphère tout autour du globe (GIA : glacio-isostatic adjustment).

Le modèle résultant qui fait le plus consensus aujourd'hui est celui d'une remontée d'environ 0,50 m depuis 1 500 ans (soit 0,3 mm/an en moyenne) et de 3,50 m sur les 5 000 années précédentes (0,7 mm/an). La question qui nous préoccupe est celle des écarts locaux par rapport à cette moyenne. Si un site présente une montée relative du niveau de la mer supérieure à 0,50 m sur les 1 500 dernières années, on en conclut qu'une subsidence de la surface du sol s'ajoute à la remontée eustatique. Une valeur inférieure à 0,50 m implique au contraire une surrection de la surface du sol.

## Comment mesurer le niveau de la mer antique ?

Parmi les marqueurs d'anciens niveaux marins les plus utilisés figurent les viviers à poisson (*piscinae*) et les ouvrages portuaires, intimement liés à l'élévation du plan d'eau marin. On utilise aussi de petits organismes vivant au niveau du plan d'eau (des « bioconstructions » littorales) dont il reste des traces en-dessous et au-dessus de l'eau après leur submersion/émersion. On a également utilisé des grès de plage (*beachrock*), qui se forment au contact des eaux salées et des eaux douces qui arrivent à la plage, ainsi que des encoches taillées dans les falaises par les vagues ou les organismes lithophages (*notches*), mais ces deux derniers marqueurs se révèlent imprécis. Dans les meilleures conditions (c'est-à-dire en utilisant les marqueurs les plus fins), on a obtenu une précision verticale de  $\pm 10$  cm (Goiran 2009). Cela dit, cette précision est généralement plutôt de  $\pm 20$  à 30 cm, ce qui, sur la période qui nous sépare de l'époque romaine, est proche de la valeur de montée du niveau

marin que l'on cherche à observer, soit environ 50 cm. La précision de la mesure sur la verticale laisse donc à désirer et ce manque de résolution ne peut être compensé que par une grande quantité d'observations.

Un autre obstacle, dans la reconstruction des changements du niveau marin, est l'incertitude entourant l'âge des marqueurs utilisés. Sauf exception (ouvrages d'art datés précisément par l'archéologie ou les textes historiques) on s'en remet le plus souvent à la datation par le radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ). Tous les archéologues savent que la précision de cette méthode est au mieux de l'ordre du siècle.

Le résultat de ces observations est généralement traduit sous la forme d'une vitesse de déplacement vertical du niveau moyen relatif de la mer en mm/an. Il faut cependant être bien conscient du fait que cette présentation sous-entend une régularité dans la vitesse de montée/descente qui n'est pas toujours réelle. En effet, on peut accepter que le niveau eustatique de la mer soit monté de façon relativement uniforme depuis l'antiquité, avec quelques pauses pendant des périodes de léger refroidissement (de l'an 1000, et du Petit Âge Glaciaire de 1450 à 1850). En revanche, les mouvements de la croûte terrestre, pendant ce temps, ont été à la fois continus (par exemple la compaction des sédiments du sous-sol), et saccadés, lorsque produits par des séismes engendrant des déplacements verticaux le long de failles, ou par la liquéfaction des sols.

De plus, et afin de ne pas trop mélanger les périodes avec des vitesses de remontée des eaux différentes, nous avons limité notre analyse à l'intervalle compris entre 1000 et 4000 BP (« Before Present » c'est-à-dire avant 1950).

## Résultat

L'analyse des diverses sources fournies en référence a permis de dresser une liste de plus de 250 sites côtiers qui ont subi de la subsidence, et près de 80 sites qui ont subi une surrection. Afin de s'assurer qu'une subsidence a réellement eu lieu, seuls les sites affectés par une remontée de plus d'un mètre sur les 2000 dernières années ont été retenus, soit autour de 0,50 m de plus que la montée eustatique des eaux.



Figure 1. Sites côtiers submergés de plus d'un mètre depuis 2 000 ans (fond de plan Google Earth).

Des subsidences ont ainsi été trouvées dans les deltas du Rhône, du Nil et du Pô, le long de la côte tyrrhénienne, de la baie de Naples, du Péloponnèse, de la côte ouest de la Turquie entre Izmir et Antalya, sur l'île de Paros dans les Cyclades, dans l'est de la Crète, le sud de Chypre, la Cyrénaïque, Sabratha, et Carthage.

Les sites de delta sont bien connus pour subir des subsidences souvent dues à la compaction du sous-sol surchargé par les sédiments apportés par le fleuve. Les sites en zones rocheuses sont soumis aux mouvements de la croûte terrestre sous l'effet des séismes, comme dans la mer Egée. La baie de Naples est affectée par des subsidences et des surrections d'ampleur produits par les variations de la pression du système hydrothermal volcanique partiellement submergé des Champs Phlégréens (mouvements dits « bradysismiques »). Enfin, les ouvrages portuaires placés sur des dépôts faiblement tassés du transit littoral de sable peuvent être soumis à la liquéfaction pendant un séisme, générant ainsi une subsidence forte et soudaine, comme en témoigne Aelius Aristide en 178 ap. J.-C. à Smyrne, ou produire une compaction des couches argileuses étalée sur des centaines d'années, comme on peut le voir sous le môle nord de Portus à Rome.

Pour ce qui concerne la surrection, notre analyse révèle que les sites se concentrent sur la partie occidentale de la Crète en raison du basculement de l'île pendant le séisme de 365 ap. J.-C. pendant lequel l'ouest de l'île s'est soulevé, tandis que l'est de l'île s'est affaissé. On note aussi une concentration des zones affectées par un soulèvement sur le nord du Levant, l'ouest de la Cilicie, l'île de Rhodes, le nord du Péloponnèse et enfin vers Dubrovnik.



Figure 2. Sites côtiers surélevés de plus d'un mètre depuis 2000 ans (fond de plan Google Earth).

La plupart de ces mouvements de subsidence et de surrection sont générés le long des interfaces des plaques tectoniques de la croûte terrestre et se traduisent par des mouvements réguliers ou plus soudain lors de séismes.

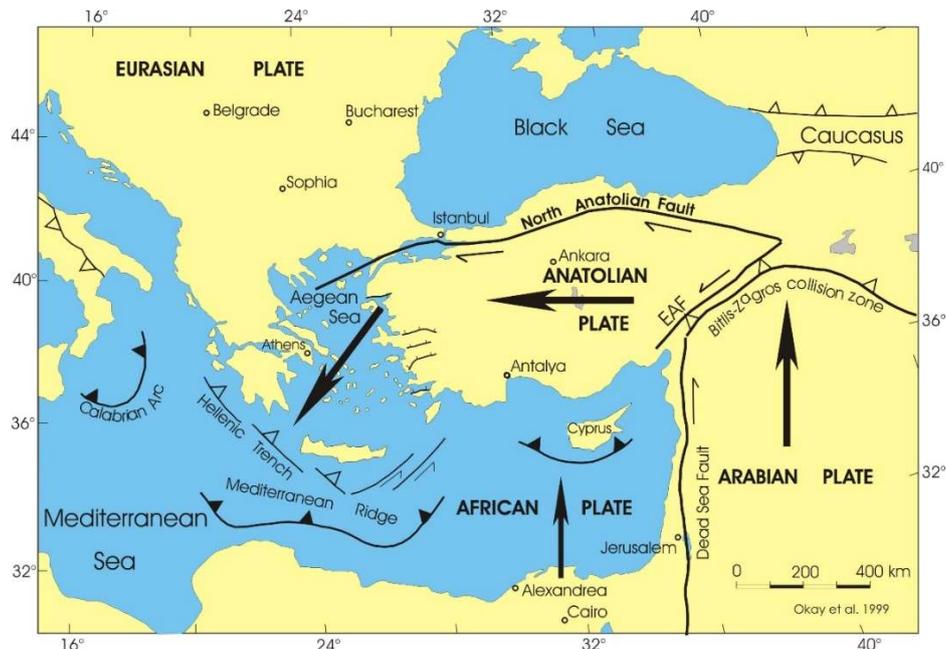


Figure 3. Principales failles et plaques tectoniques du Proche Orient (source : New Scientist, 2011).

La figure 3 est une représentation très schématique des failles actives dans le bassin méditerranéen oriental (voir aussi Liberatore et al. 2023). La tectonique de la région est dominée par le déplacement vers le nord de la plaque africaine sous la plaque anatolienne, et une remontée un peu plus rapide de la plaque arabique, en collision avec l'Asie au niveau de l'Iran, provoquant une expulsion vers l'ouest de la microplaque anatolienne (Turquie et Grèce). Le différentiel de vitesse de déplacement entre les plaques arabique et africaine est accommodé par une faille coulissante (faille du Levant ou faille de la mer Morte), à l'origine de la mer Morte, de la vallée du Jourdain et de la plaine de la Beqaa. La faille nord-anatolienne passe par Istanbul et il existe un arc volcanique passant sur les îles d'Egine, Milos, Santorin et Nysiros/Gyali/Kos. La Mer Egée résulte de l'étirement de la microplaque anatolienne au niveau de la Grèce, provoquant l'engloutissement progressif des îles de la mer Egée.

### Conclusion

Il ne s'agit pas ici d'une étude exhaustive de l'ensemble du bassin méditerranéen et de nombreux sites de subsidence et de surrection vont probablement venir s'ajouter à cette liste au gré des études de terrain à venir. Des tendances générales ont cependant déjà pu être dégagées et elles correspondent aux connaissances actuelles des géo-tectoniciens.

## Liste des figures : (avec les légendes et crédits)

Fig.1. Sites côtiers submergés de plus d'un mètre depuis 2000 ans (fond de plan Google Earth).

Fig. 2. Sites côtiers surélevés de plus d'un mètre depuis 2000 ans (fond de plan Google Earth).

Figure 3. Principales failles et plaques tectoniques du Proche Orient (source : New Scientist, 2011).

## Références :

DE GRAAUW A. 2023 *Subsidence of coastal structures*,

<https://www.ancientportsantiques.com/ancient-port-structures/subsidence/>

FAIVRE S. et al. 2023 *Driving processes of relative sea-level change in the Adriatic during the past two millennia*, Global and Planetary Change, Elsevier.

FLEMMING N. 1978 *Holocene Eustatic Changes and Coastal Tectonics in the Northeast Mediterranean: Implications for Models of Crustal Consumption*, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 289, No. 1362, (p 405-458).

GOIRAN J-P. et al. 2009 *Découverte d'un niveau marin biologique sur les quais de Portus : le port antique de Rome*, Méditerranée 112, (<http://mediterranee.revues.org/3177>).

KIZILDAG N. 2021 *Relative sea-level changes along the Fethiye coast (SW Turkey) based on recent archaeological data*, Geoarchaeology, Wiley, (p 1-16).

KIZILDAG N. 2018 *Late Holocene sea level change along the coast of Fethiye Gulf in southwestern Turkey*, Geoarchaeology, Wiley, (p 1-16).

KOLAITI E. & MOURTZAS N. 2020 *New insights on the relative sea level changes during the Late Holocene along the coast of Paros island in the northern Cyclades (Greece)*, Annals of Geophysics, 63, OC669.

KOLAITI E. & MOURTZAS N. 2016 *Upper Holocene sea level changes in the West Saronic Gulf, Greece*, Quaternary International 401, Elsevier, (p 71-90).

LAMBECK K. et al. 2018 *Tyrrhenian sea level at 2000 BP: evidence from Roman age fish tanks and their geological calibration*, Satellite Positioning For Geosciences, Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, Springer.

LAMBECK K. et al. 2014 *Evidence of active subsidence at Basiluzzo island (Aeolian islands, southern Italy) inferred from a Roman age wharf*, Satellite Positioning For Geosciences, Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, Springer.

LIBERATORE M. et al. 2023 *Vertical velocity fields along the Eastern Mediterranean coast as revealed by late Holocene sea-level markers*, Earth-Science Reviews 234, Elsevier, (p 1-26).

LOVEN B. 2022 *Zea Harbour Project, Evidence of relative sea-level change in the Piraeus*, International Online Conference, May 4<sup>th</sup>, 2022, Athens.

MAZZA A. 2016 *Reconstructing the coastal landscape of Selinus (Sicily, Italy) and Lipari Sotto Monastero (Lipari, Italy)*, in Geoarchaeology of the Mediterranean Islands, CNRS Editions, (p 177-190).

MOURTZAS N. et al. 2016 *Vertical land movements and sea level changes along the coast of Crete (Greece) since Late Holocene*, Quaternary International, Elsevier, (p 1-18).

MOURTZAS N. & KOLAITI E. 2013 *Historical coastal evolution of the ancient harbor of Aegina in relation to the Upper Holocene relative sea level changes in the Saronic Gulf, Greece*, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 392, Elsevier, (p 411–425).

PAVLOPOULOS K. et al. 2011 *Vertical displacement trends in the Aegean coastal zone (NE Mediterranean) during the Holocene assessed by geo-archaeological data*, *The Holocene*, 22(6), (p 717-728).

SIVAN D. et al. 2010 *What can a sessile mollusk tell about neotectonics?*, *Earth and Planetary Science Letters* 296, (p 451–458).

STANLEY J-D. 2009 *Ancient Archaeological Sites Buried and Submerged along Egypt's Nile Delta Coast*, *Journal of Coastal Research*, 25, 1, (p 158–170).

**Mots-clés :**

Port antique, structure portuaire antique, brise-lame, subsidence, surrection

**Bios :**

[Arthur de Graauw](https://www.ancientportsantiques.com) est ingénieur maritime, spécialisé dans les ports antiques. Il est chercheur associé à l'UMR 5133-Archéorient, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, Lyon 2. Il publie sur son site <https://www.ancientportsantiques.com>.

[Gilles Brocard](#) est spécialiste de géomorphologie continentale, de néotectonique, et de la Zone Critique. Il est chercheur associé de l'UMR 5133-Archéorient, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, Lyon 2.