

Adaptation des littoraux à l'élévation du niveau marin : Spécificité de certaines côtes de Scandinavie

Jean-Marc BEYNET¹

1. Ingénieur conseil en aménagements littoraux et portuaires maritimes et fluviaux,
35, rue de Peyrouse, 30320 Marguerittes, France.
beynet.consult@gmail.com

Résumé :

En raison du réchauffement climatique, la mer monte et menace de submerger certaines zones littorales, îles et villes côtières sur la période 2050-2100. Si nous ne réduisons pas nos rejets de CO₂ et méthane dans l'atmosphère les générations futures devront s'adapter. Ce sera encore pire pour les littoraux sujets à la subsidence, comme la Camargue par exemple. Mais à l'inverse, en Scandinavie, certaines côtes et îles s'élèvent de plusieurs mm/an, comme c'est le cas en Baltique, dans le Golfe de Botnie. Il s'agit d'une particularité qui mérite d'être soulignée en expliquant les raisons de ce soulèvement. De tels littoraux, qui font l'objet d'un ajustement isostatique ou rebond post-glaciaire, seront moins impactés par l'élévation du niveau marin dans les décennies à venir.

Mots-clés : Fonte des glaciers, Subsidence, Adaptation littoraux, Elévation niveau marin, Rebond post-glaciaire, Isostasie.

1. Les cycles de Milanković et le réchauffement climatique

En 1941, Milutin Milanković, mathématicien et astronome Serbe a expliqué l'alternance des cycles glaciaires et interglaciaires durant le Quaternaire (MILANKOVIC, 1941, 1944 ; IVANOVIC, 2012). La glaciation se produit lorsque les hautes latitudes de l'hémisphère nord reçoivent un rayonnement solaire réduit pendant l'été. Et ce sont trois paramètres astronomiques qui se combinent pour influencer le climat sur la Terre :

- L'excentricité de l'orbite terrestre: L'orbite terrestre est une ellipse, dont le Soleil est un des foyers. L'excentricité de l'ellipse correspond à la distance entre les deux foyers. Lorsque l'excentricité est faible, l'orbite terrestre est presque circulaire. L'excentricité varie en fonction des attractions gravitationnelles exercées entre la Terre et les autres planètes. La période caractéristique de variation de ce paramètre est de 100 000 ans.
- L'obliquité de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique: L'angle formé par la direction des pôles et celle de la normale au plan de l'écliptique n'est pas constant. Il varie entre 22° et 24,5° sur une période de 41 000 ans. Ainsi,

Thème 7 – Risques côtiers

suivant l'obliquité, les pôles ne reçoivent pas le même niveau de rayonnement solaire.

- La précession des équinoxes: La Terre tourne sur elle-même comme une toupie. Son axe de rotation balaie un cône, qui varie avec une période de 20000 ans. L'inclinaison de l'axe de rotation terrestre n'affecte pas la quantité totale de chaleur solaire reçue sur Terre, mais sa distribution.

Cette théorie permet d'expliquer les grandes variations climatiques des cycles glaciaires. Ainsi, le climat se réchauffant peu à peu depuis la dernière période de glaciation, le niveau de la mer s'est élevé de 120 mètres depuis le pic de cette dernière glaciation il y a 20 000 ans environ, avec les niveaux intermédiaires approximatifs ci-après, jusqu'à nos jours, tableau 1.

Tableau 1 : Remontée du niveau des mers depuis 20000 ans.

<i>Période avant notre ère</i>	<i>18 000 ans</i>	<i>11 000 ans</i>	<i>8 000 ans</i>	<i>3 000 ans</i>
<i>Niveau de la mer</i>	<i>-120 m</i>	<i>-50 m</i>	<i>-20 m</i>	<i>-1 m</i>

Ces valeurs restent approchées car la remontée du niveau de la mer n'a pas été linéaire dans le temps. Il y a eu des variations selon les époques. La remontée la plus rapide s'est faite sur la période 18 000 – 5 000 av. J.-C. Entre 4000 et 500 ans avant J.-C., la vitesse maximale de montée relative du niveau marin est de 0,03 cm/an environ. Entre 500 ans avant J.-C. et 250 ans après J.-C., la montée relative du niveau de la mer est beaucoup plus rapide (0,13 cm/an). Et depuis la fin du XVIII^e siècle, en raison des émissions massives de CO₂ et méthane dans l'atmosphère par les activités industrielles, cette remontée des mers du globe est en nette accélération, même si elle est imperceptible pour certains.

En résumé, selon la théorie de Milanković, le maximum glaciaire est dû à la position de la Terre par rapport au soleil. Son axe de rotation et son obliquité ainsi que l'éloignement de son astre du fait de l'orbite elliptique de la planète réduisent l'apport de chaleur et expliquent les alternances d'âge glaciaire et de périodes de réchauffement. Le rapprochement de la Terre de son soleil et un axe avec une obliquité plus favorable font remonter les températures entre 20 000 et 12 000 ans, début de l'holocène, notre actuelle ère géologique. Comme l'a expliqué le professeur Edouard Bard (Professeur au Collège de France et chercheur au Centre de recherche sur les géosciences (CEREGE, Aix-en-Provence) :

« On assiste à partir de -15 000 ans à une rapide montée des eaux de 40 à 50 mm par an due à la fonte des grands inlandsis nord-américains et scandinaves, puis à un ralentissement de 8 à 12 mm par an entre -10 000 et -5 000 ans pour atteindre une quasi-stagnation de 1 mm par an depuis 5 000 ans ».

2. Littoral Est de la Suède : Golfe de Botnie

Alors que plusieurs régions dans le monde subissent un lent enfoncement de leurs sols, appelé subsidence, comme la Camargue par exemple qui s'enfonce de 2 mm par an selon le Parc naturel régional de Camargue (BEYNET, 2020, 2021), d'autres régions se soulèvent, comme une partie de la Suède. Dans son rapport AR6 publié le 9 août 2021, le GIEC évoque cette spécificité de certains littoraux :

C.2.5 : « Il est très vraisemblable, voire pratiquement certain, que l'élévation relative moyenne régionale du niveau de la mer va continuer au cours du 21^{ème} siècle, à l'exception de quelques régions connaissant des taux substantiels de soulèvement géologique des terres » (GIEC, 2021).

Le soulèvement des sols est en cours dans la moitié nord de la Suède en raison de la fonte des glaciers imposants de la dernière période glaciaire. Cette élévation postglaciaire des terres affecte les systèmes de référence géodésique et est un élément important à prendre en compte lorsqu'on souhaite recalculer les coordonnées entre différentes époques (ÅGREN *et al.*, 2007). Ce soulèvement du sol est le retour de la croûte terrestre à sa position d'équilibre, après avoir été chargée d'une épaisseur de plusieurs kilomètres de glace au cours de la dernière période glaciaire:

« Aujourd'hui encore, le socle terrestre cherche son équilibre, libéré du poids des derniers glaciers, il remonte au Nord et à l'Est et descend au Sud et à l'Ouest. L'ampleur des mouvements terrestres varie d'une région à l'autre. Les évolutions des paysages maritimes sont particulièrement marquées au nord du Limfjorden » (NISSEN-JAUBERT, 2005).

Lorsque la glace a commencé à fondre il y a 20 000 ans environ, la pression sur la croûte terrestre a diminué et les sols ont débuté une lente élévation. Il y a de l'ordre de 10 000 ans, les derniers glaciers ont disparu en Scandinavie. Cependant, en raison des couches visqueuses de l'intérieur de notre planète Terre, cela a pris beaucoup de temps pour revenir à l'équilibre. Jusqu'à nos jours, le pays s'est élevé de plusieurs centaines de mètres et on estime qu'il reste plusieurs dizaines de mètres à venir. Le soulèvement des terres varie selon les zones géographiques. Le plus important se trouve dans le nord de la Suède, sur la côte du golfe de Botnie (environ 10 mm/an), tandis que dans la partie la plus méridionale du pays (Scanie), le soulèvement s'est pratiquement arrêté, figure 1. C'est ainsi que la Scandinavie se soulève avec une vitesse pouvant atteindre 9 mm/an. Dans la Haute Côte - située sur la rive occidentale du golfe de Botnie qui prolonge la mer Baltique vers le nord - depuis le retrait final des glaces il y a 9.600 ans, le relèvement est de l'ordre de 285 m. C'est le rebond isostatique postglaciaire le plus important jamais observé.

Thème 7 – Risques côtiers

« Sur cette côte, des îles apparaissent et s'unissent, des péninsules grandissent, des lacs se forment au fond des baies et deviennent des marais et des fagnes tourbeuses » (CARON *et al.*, 1998).



Figure 1. Localisations du Golfe de Botnie sur la côte Est de Suède, d'une part et d'autre part, de la région Scanie tout au Sud (Source Navionics). La ligne en pointillé de couleur orange indique la limite de la calotte glaciaire il y a 10000 ans (selon BJÖRCK, 2008).

Quant aux îles, il en existe plusieurs milliers autour de la Suède, la plupart appartenant aux trois principaux archipels de Stockholm et Karlskrona (côté mer Baltique) et de Göteborg (côté mer du Nord). L'archipel de Stockholm, est le plus important, figures 2 et 3. Il s'étend sur une soixantaine de kilomètres à l'Est de la capitale et sur près de 120 kilomètres le long de la côte. La ville de Stockholm s'est bâtie sur 14 îles d'un archipel qui en compte environ 24 000 de toutes tailles (BEYNET, 2021). Ces îles ont été formées par l'élévation du terrain, qui gagne encore de nos jours environ cinq millimètres par an à la latitude de Stockholm, et près du double plus au nord, au fond du golfe de Botnie, ainsi que nous venons de le voir.

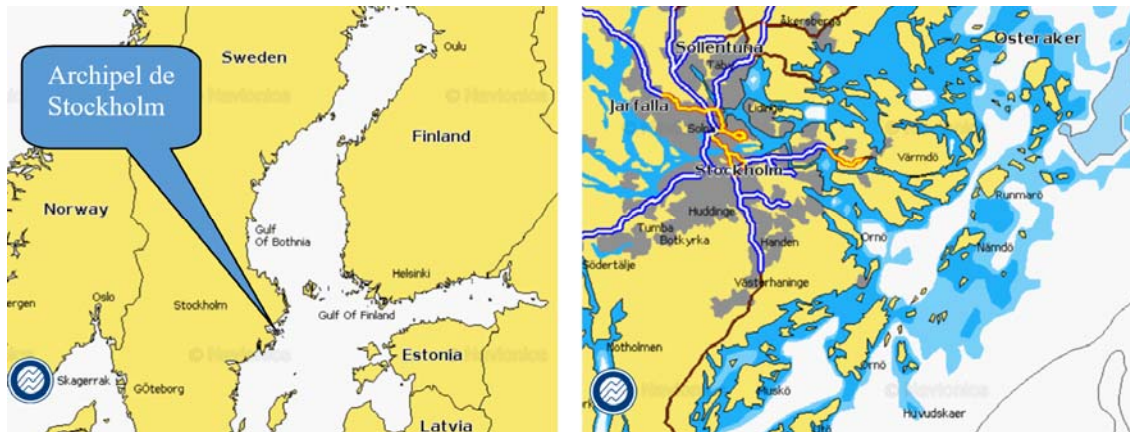


Figure 2. Archipel de Stockholm (Source Navionics).



Figure 3. Une des îles de l'archipel de Stockholm (cliché © Beynet, 2008).

3. Littoral Sud de la Suède : Scanie

La moitié nord de la Suède se soulève en raison du rebond post-glaciaire. Mais ce n'est pas le cas du sud de la Suède, dans la région Scanie par exemple, qui n'avait pas été chargée par des masses importantes de glaciers au quaternaire. De ce fait, le littoral de la Scanie est vulnérable en raison de l'élévation continue du niveau de la mer et de l'érosion par les houles et courants côtiers, le long de cette côte Sud, où les terres sont constituées de sols peu cohérents, donc érodables. Le changement climatique, conséquence de l'augmentation future de la température atmosphérique, renforcera cette érosion. Les traits de côte les plus menacés se trouvent ici, tout au sud de la Suède, en Scanie et en Blekinge, ainsi que sur les îles d'Öland et de Gotland. Au sud de la Scanie, la commune de Vellinge est vulnérable car une grande partie de la population vit dans les communes de Skanör-Falsterbo, Ljunghusen, Höllviken et Kämpinge, figures 4 et 5. De nombreux bâtiments sont implantés sur des zones situées à des niveaux inférieurs

Thème 7 – Risques côtiers

à trois mètres au-dessus du niveau moyen actuel de la mer. La municipalité de Vellinge est en train de construire une protection contre la submersion marine autour de Falsterbonäset. Cet ouvrage de défense des côtes contre l'élévation du niveau de la mer respectera le paysage de la zone en question.

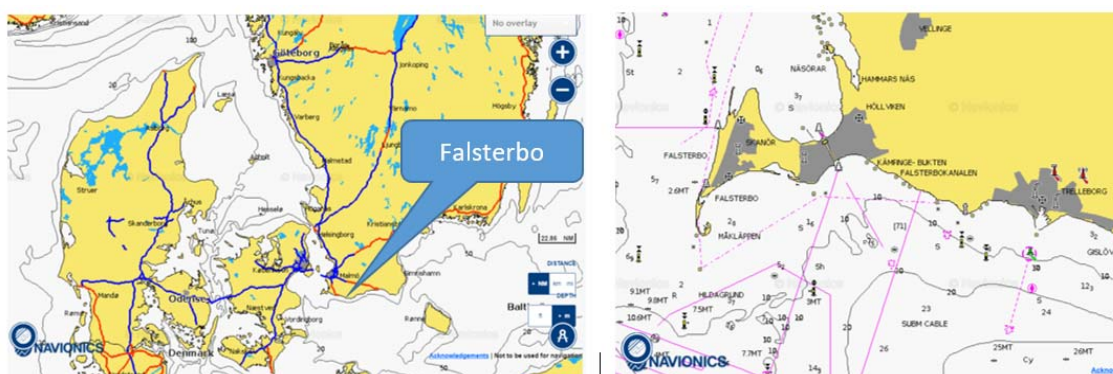


Figure 4. Extrait de carte marine pour localiser la Scanie et le phare de Falsterbo, (Navionics, ne pas utiliser pour la navigation).



Figure 5. Pointe Sud de la Suède : Falsterbo Golfklubb (cliché © Beynet, 2013).

4. Conclusions

En raison du rebond post-glaciaire, la moitié Nord de la Suède se soulève, en particulier dans le Golfe de Botnie, y compris pour les îles de l'archipel de Stockholm en mer Baltique. Ce littoral et ses îles seront donc moins impactés par l'élévation du niveau de la mer, que d'autres littoraux qui eux le subissent, comme par exemple la bande côtière de la région Scanie, qui ne se soulève pas et qui au contraire est vulnérable à l'érosion et à la submersion marine. Rappelons qu'en raison du dérèglement climatique, depuis

1970 le niveau moyen des mers s'est déjà élevé de 20 cm et d'ici 2050, il faut s'attendre entre +20 et +30 cm supplémentaires (GIEC, 2021). Pour la fin du siècle, l'augmentation du niveau de la mer devrait être nettement plus importante, +1 m, voire plus, en fonction de la poursuite (ou non) de nos émissions de CO₂ et méthane dans l'atmosphère.

Remerciements

L'auteur remercie la Société NAVIONICS qui l'a autorisé à insérer des extraits de cartes marines pour illustrer ses textes descriptifs permettant ainsi de localiser les lieux cités. Il remercie en particulier M. Paolo Cignoni, *Strategic Data Acquisition and Licensing Director*.

5. Bibliographie

- ÅGREN J., SVENSSON R. (2007). *Postglacial land uplift model and system definition for the new Swedish height system RH2000*. Lantmäteriet, reports in geodesy and geographic information systems, Gävle Sweden, p 4, LMV-rapport 2007:4, ISSN 280-5731
- BEYNET J.M. (2020). *Habiter ou abandonner le littoral d'ici 2100*, Nombre7 Editions, Nîmes, 240 p., ISBN: 9782381531717
- BEYNET J.M. (2021). *La vie des îles, naissance, histoire, présent, futur probable...*, Nombre7 Editions, Nîmes, 320 p., ISBN : 978-2-38153-459-6
- BJÖRCK S. (2008), *The late Quaternary development of the Baltic Sea basin*, GeoBiosphere Science Centre, Department of Geology, Quaternary Sciences, Lund University, Sölveg. 12. SE-223 62 Lund Sweden. ISBN 978-3-540-72785-9
- CARON J.M., GAUTHIER A., SCHAAF A., et al., (1998), *Comprendre et enseigner la Planète Terre*, Ophrys Editions, 271 p., ISBN-13 : 978-2708007673
- GIEC (2021). *AR6, Rapport du Groupe de travail n°1*, publié le 9/08/2021.
- IVANOVIC M. (2012). *Milutin Milanković (1879-1958), one of the most significant scientist of 20th century*. Economy of eastern Croatia yesterday, today, tomorrow, Josip Juraj Strossmayer Univ. of Osijek, Faculty of Economics, Croatia, Vol. 1, pp. 326-335, https://www.researchgate.net/publication/316597435_Milutin_Milankovic_1879-1958_-_One_of_the_Most_Significant_Scientists_of_20th_Century
- MILANKOVIC M. (1941). *Kanón der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Königlich Serbische Akademie, Spec. publ. 132, Section des Sciences Mathématiques et Naturelles Tome 33, 1941. (Published in English : *Canon of Insolation and the Ice-Age Problem*, by Israel Program for Scientific Translation, for the U.S. Department of Commerce and the National Science Foundation, Washington D.C., 1969), <https://www.worldcat.org/title/kanon-der-erdbestrahlung-und-seine-anwendung-auf-das-eiszeitenproblem/oclc/10153781>
- MILANKOVIC M. (1944). *Memories, Profesional experience and knowledge*, vol. 1: 1879-1909, vol. 2: 1909-1944, vol. 3: after 1944, Serbian Academy of Sciences, section

Thème 7 – Risques côtiers

of Mathematical and Natural Sciences, n°50, 6 and 16, 1950 (1979), 1952, 1957. (in Serbo-Croatian), https://www.persee.fr/doc/hism_0982-1783_1988_num_3_3_1344

NISSEN-JAUBERT A. (2005), *Lieux de pouvoir et voies navigables dans le sud de la Scandinavie avant 1300*, article publié dans l'ouvrage *Ports maritimes et fluviaux au Moyen-Âge*, Société des historiens médiévistes de l'enseignement supérieur public. Publication de la Sorbonne. <https://doi.org/10.3406/shmes.2004.1880>