



Guy WÖPPELMAN

Université de La Rochelle,
UMR CNRS 7266 LIENSs

2.6 | Évolution du niveau de la mer à la côte et déplacements verticaux terrestres

Bonjour à toutes et à tous.

En guise de transition avec l'exposé de Benoît Meyssignac, je vais revenir sur les différents types d'instruments qui sont à notre disposition pour observer le niveau de la mer.

Marégraphes et satellites altimétriques

Depuis 25 ans, nous avons des satellites qui observent le niveau de la mer par rapport au centre des masses de la Terre. Leur avantage très net, c'est leur couverture spatiale.

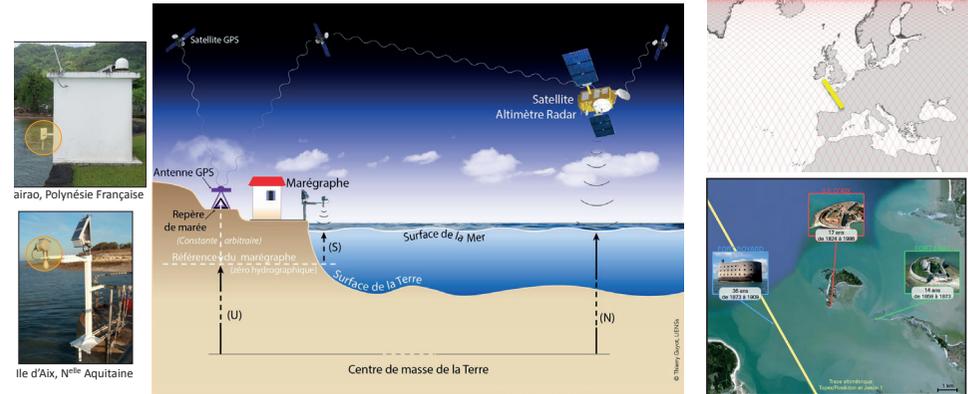
En revanche, ils ont quelques limitations : certaines sont sur le point d'être surmontées, en particulier l'approche aux côtes puisque les observations à 1-2 cm s'arrêtent à une dizaine de kilomètres de la côte. L'autre difficulté, c'est qu'en termes d'interprétation, c'est une mesure par rapport au centre des masses de la Terre.

On a également, à notre disposition et là depuis plutôt plusieurs dizaines d'années, voire 150 ans pour les enregistrements les plus longs, dont celui de Brest, des marégraphes qui sont, eux, à la côte et qui observent le niveau de la mer par rapport au socle sur lequel ils reposent. C'est finalement ces marégraphes qui nous donnent une information sur ce que nous ressentons et que l'origine soit sur une montée des océans liée à la fonte des calottes polaires ou bien liée à des processus de géophysique de déplacement de la côte. Et c'est sur ces processus-là, que va se centrer plutôt mon exposé.

Quelques images pour montrer ce que sont ces instruments. Ce sont des instruments plutôt modernes. Et lorsqu'on remonte dans le temps, ces instruments sont plutôt des instruments mécaniques.

J'ai une petite illustration diapo 02 pour évoquer le problème à la côte et qui est lié à un des instruments qui sont marqués, dont parlait Benoît Meyssignac, qui est le radiomètre à vapeur.

Les deux types de mesure instrumentale du niveau de la mer



Diapo 02 > Marégraphes et satellites altimétriques

I. PANORAMA DES PROCESSUS À L'ORIGINE DES DÉPLACEMENTS À LA SURFACE DE LA TERRE SOLIDE

Une grande variété de phénomènes géophysiques

Alors quels sont les processus géophysiques qui peuvent causer des mouvements verticaux à la côte?

Une petite illustration de la variété des phénomènes géophysiques qui déforment la surface de la Terre : nous avons une croûte terrestre de quelques dizaines de kilomètres qui repose sur du magma. C'est plus de 3000 km avec le manteau supérieur et le manteau inférieur et qui, à des échelles de temps longues, se comporte comme un fluide.

Notre planète est dynamique. Nous avons donc des déplacements de plaques tectoniques et nous verrons dans le focus que nous fera Valérie BALLU juste après mon exposé, les problèmes sur les mouvements verticaux associés à des questions de subduction.

Il y a également l'activité volcanique qui peut créer des mouvements verticaux du sol liés au gonflement des chambres magmatiques ou des gonflements, les séismes, bien entendu.

Je voudrais faire brièvement une description d'un autre phénomène qui, à une échelle planétaire est lié justement aux cycles de glaciation et déglaciation.

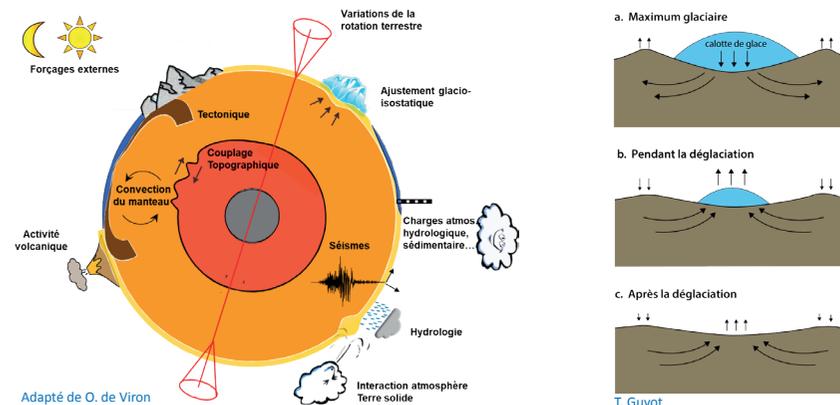
Dans le chemin ci-contre vous avez une situation d'ère glaciaire (a.). Vous avez de l'eau des océans qui a été piégée sur les continents. Vous avez d'énormes calottes polaires de plusieurs kilomètres qui, en fait, ont un poids. Donc, les couches fluides, les masses fuient, se compensent. C'est ce qu'on appelle l'ajustement glacio - isostatique et nous avons un enfoncement de la Terre solide qui se comporte d'une manière plutôt élastique. Et en périphérie, comme vous le voyez, nous avons un soulèvement de la surface de la Terre.

Pendant la déglaciation (b.), nous avons des phénomènes inverses. Donc là où sont les calottes qui fondent, nous avons un mouvement de soulèvement et de soulèvement. Et en périphérie, on a un mouvement vertical de subsidence, donc, un mouvement vertical de tassement.

Après la déglaciation (c.), même bien après cette période de la dernière déglaciation il y a quelque 20 000 ans, on a encore sous l'écorce terrestre, des mouvements de masse qui sont en dessous, qui continuent à affluer vers les anciennes zones couvertes par ces calottes polaires. Il y en a encore en soulèvement et en périphérie, une subsidence.

J'illustrerai ce phénomène un peu plus en détail, tout à l'heure.

Besoin de transdisciplinarité (glaciologues, océanographes, météorologues, géologues, géodésiens, astronomes...)



Diapo 04 > Une grande variété de phénomènes géophysiques

Principales causes des déplacements verticaux de la surface terrestre et caractéristiques

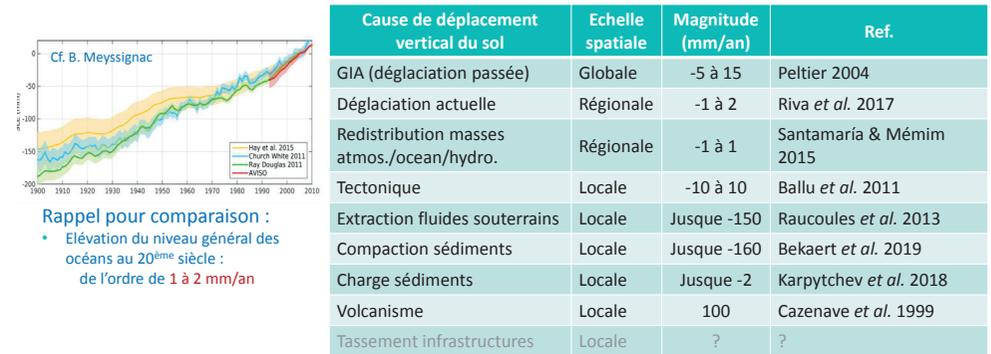
Je suis allé regarder un petit peu la littérature pour avoir des ordres de grandeur de l'ampleur de ces différents phénomènes qui sont listés là et qui ont été publiés par différents collègues.

Ce qu'il faut regarder, c'est ce graphique de Benoit avec ces 1-2 mm par an et sur les 25 dernières années, 3 mm par an, et comparez ça à des phénomènes tels que l'ajustement glacio-isostatique dont je parlais tout à l'heure, ainsi que l'ajustement actuel lié à la déglaciation actuelle, mais qui est plus modeste, comme vous pouvez le voir, et également, les autres phénomènes qui sont indiqués là.

Vous voyez que ce taux de montée peut être observé dans les océans plusieurs fois sur les 5 dernières années, avec parfois un ordre de 1 ou 2 de grandeur.

Par contre, pour les échelles spatiales que vous voyez dans cette colonne, à part ce phénomène-là qui a une emprise vraiment globale, les autres vont avoir des emprises plutôt localisées.

Principales causes des déplacements verticaux de la surface terrestre et caractéristiques



II. QUELQUES EXEMPLES CONCRETS DE LEUR IMPORTANCE SUR LE NIVEAU DE LA MER À LA CÔTE

2 exemples concrets sur l'importance de ces mouvements verticaux à la côte.

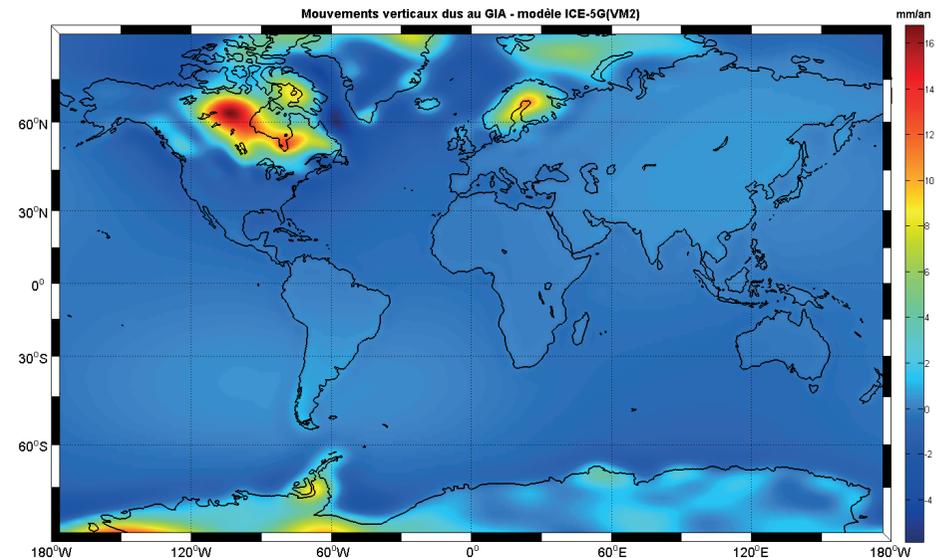
Rebond postglaciaire (déglaciation, ~19 000 ans BP)

Effet global mais surtout dans les régions recouvertes par des calottes de glace (en périphérie et sous les océans subsidence)

Tout d'abord, liés à ce phénomène qu'on appelle aussi rebond post-glaciaire lié à la dernière déglaciation. Ce que vous avez ici représenté, c'est un modèle géophysique de ce phénomène et on reconnaît bien les anciennes calottes qui ont totalement disparu au nord de l'Europe et au nord de l'Amérique, avec un soulèvement très net de l'ordre du centimètre par an. Et partout ailleurs, vous voyez, surtout au niveau de la surface des océans, on a plutôt une subsidence et cette subsidence-là, si vous faites un calcul d'une moyenne sur l'ensemble des océans, elle n'est pas négligeable, même si on reste quand même modeste de l'ordre de 10 % de ce qu'on observe comme montée générale du niveau des mers, c'est de l'ordre de 0,2-0,3 mm par an.

Autrement dit, un satellite qui observerait le niveau de la mer par rapport au centre de masse de la Terre et qui verrait une stabilité de la mer, ne verrait pas que le niveau la mer est en train de monter de 0,2 -0,3 mm par an.

Diapo 05 > Principales causes des déplacement verticaux de la surface terrestre et caractéristiques



Diapo 07 > Rebond postglaciaire (déglaciation, ~1900 ans BP)

Faisons un petit focus dans l'Europe du Nord, et plus particulièrement en Finlande, à Vaasa. Dans cette ville-là, le modèle prédit près de 1 cm par an, 9 mm par an et l'enregistrement marégraphique se trouve au port de Vasa, mais vous le voyez là, avec un lissage. Ce qui est observé, c'est bien une baisse du niveau de la mer relatif par rapport à la côte. Et l'exercice qui a été fait par le collègue finlandais, ici il y a quelques années, c'est de prendre ces projections du climat et regarder dans le futur.

Et vous voyez que les citoyens de Vasa vont connaître quelque chose d'assez exceptionnel qui est une stabilité finalement du niveau la mer à l'horizon du 21^e siècle alors que pendant des centaines et des milliers d'années, ils ont vu reculer ce niveau, avec des stratégies de gestion du littoral assez différentes de ce qu'on peut anticiper ailleurs.

Compaction sédiments, extraction fluides souterrains...

Effet régional mais taux de subsidence souvent importants, très supérieurs à la montée générale du niveau des océans

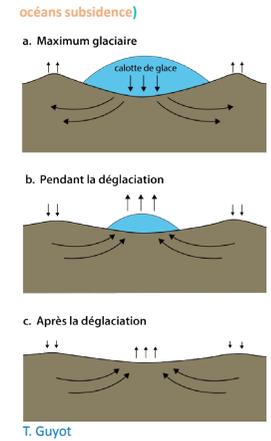
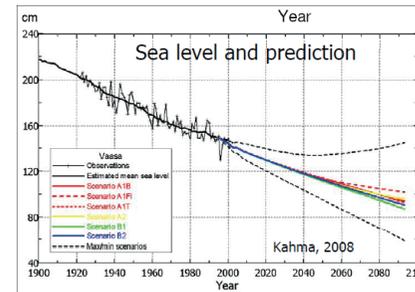
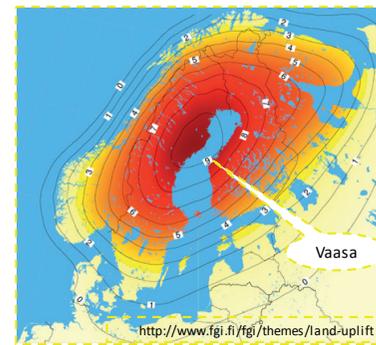
Ailleurs dans le monde, ici, dans le nord du golfe du Mexique, à Grand Island - ce n'est pas loin de l'embouchure du delta du Mississippi - on voit que le taux de montée indiqué par le marégraphe est de l'ordre de 9 mm par an. C'est l'inverse de celui de Vaasa.

Et ces 9 mm par an ont été observés par un marégraphe qui a démarré dans les années 1930. En parallèle, l'administration américaine avait commencé à faire des photographies du territoire et vous voyez sur la carte où est situé ce marégraphe, avec une reconstitution du trait de côte et en 1932, donc, 2 ans après la mise en opération du marégraphe.

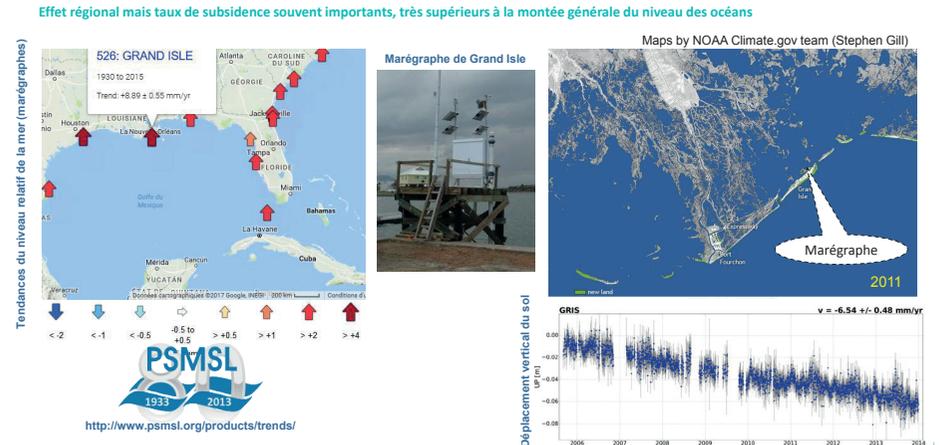
Et fig.02, 70 ans plus tard, le trait de côte. Donc, effectivement ce n'est pas du tout les mêmes conséquences qu'en Finlande.

Alors, ces 9 mm par an, on les comprend en grande partie, puisque depuis une dizaine d'années, on a installé 10 stations d'observation à proximité du marégraphe, j'y reviendrai dans un instant, c'est une station GPS.

Et ce que vous voyez fig. 03, c'est une série temporelle qui démarre en 2005 et dans laquelle on calcule une position de cette station tous les jours. Ce qu'on voit, c'est une tendance effectivement à la subsidence, donc, à la baisse du sol. Et cette tendance est de l'ordre de 5-6 mm, ce qui explique deux-tiers à trois-quarts de l'observation du marégraphe.



Diapo 07 bis > Rebond postglaciaire (déglaciation, ~1900 ans BP)



Diapo 08 > Compaction sédiments, extraction fluides souterrains

Enregistrements des marégraphes

Des exemples comme ça, on peut en trouver un peu partout dans le monde.

C'est illustré ici avec des enregistrements marégraphiques en différents lieux du monde. Ce que je voudrais souligner, c'est que le seul processus géophysique pour lequel on ait des modèles, pour que l'on puisse anticiper l'avenir avec la qualité suffisante de ces quelques millimètres par an, et bien, c'est cet ajustement glacio-isostatique. Pour tous les autres, nos connaissances ne sont pas encore assez fines.

Donc, l'alternative à cette connaissance est la mesure, jusqu'à ce que le processus soit bien compris et qu'on puisse le modéliser de manière satisfaisante. Cette mesure-là, on peut la faire, depuis une décennie ou deux, à travers des méthodes qu'on appelle de géodésie spatiale et en particulier, les méthodes GPS.

Les instruments ne sont pas du même type que ce que vous avez dans les voitures. Ils vont capter des signaux avec une résolution beaucoup plus fine et on ne va pas faire confiance non plus aux orbites qui sont radiodiffusées par les Américains, on va ré-analyser les forces sur ces orbites de façon à les restituer avec la qualité nécessaire.

III. CONNAISSANCE DES DÉPLACEMENTS PAR L'ANALYSE DE MESURES INSTRUMENTALES

Mesure des déplacements du sol par GPS

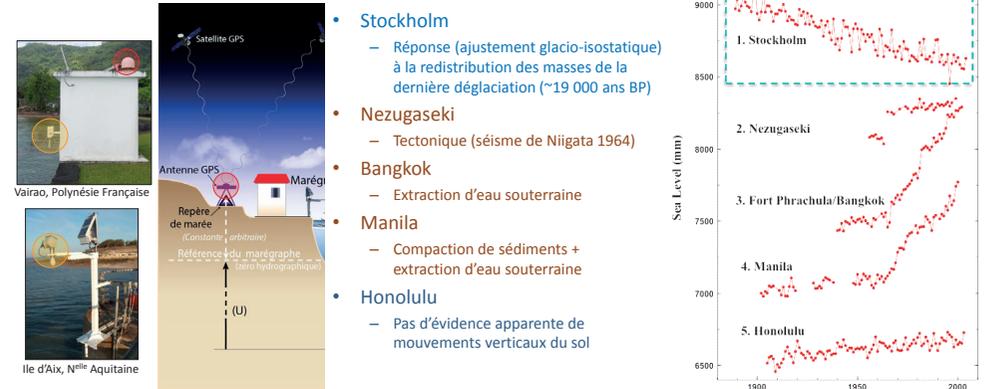
Alors, justement cette connaissance des déplacements par l'analyse de mesures instrumentales, c'est à l'Université de La Rochelle que l'on a développé une expertise sur cette analyse de la mesure GPS, dédiée aux stations qui sont proches des côtes.

Ce qui est représenté ici, c'est la dernière solution que l'on a obtenue et qui était publiée en 2017. C'est une solution qui analyse des mesures depuis 1995. Avant, on n'avait pas de stations qui étaient déployées, ou elles étaient plutôt rares, ou dans un mode qui ne permettait pas d'atteindre le niveau de précision dont on a besoin.

Ce que l'on voit ici, ce sont les structures dont on parlait tout à l'heure de rebond post-glaciaire et on voit, par ailleurs, les flèches qui sont bleues, c'est plutôt de la subsidence.

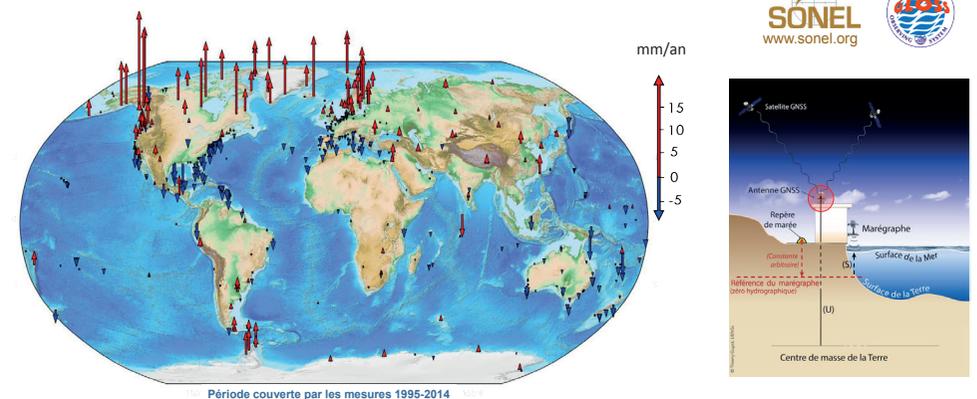
Par exemple, on aperçoit dans les côtes nord-américaines, une subsidence un peu plus prononcée que dans les côtes européennes. Ces résultats, on les a appliqués. Éric Chaumillon m'a demandé d'apporter des résultats scientifiques récents, Benoît Meyssignac en a aussi parlé tout à l'heure.

La mesure du marégraphe = niveau de la mer / niveau du sol à la côte



Diapo 09 > Enregistrements des marégraphes

Composante verticale – Dernière solution de l'Université de la Rochelle (Santamaria-Gomez et al. 2017)



Diapo 11 > Mesure des déplacements du sol par GPS

IV. APPLICATION DE CES RÉSULTATS GPS

L'élévation générale du niveau des mers au 20^e siècle

Il a dit qu'il manquait une courbe, une courbe qu'on a effectivement obtenue avec les collègues allemands, espagnols, américains et hollandais. On a ré-analysé les observations des marégraphes et on a fait ce qu'on appelle une reconstruction.

J'ai placé celles qui étaient parmi la plus citée des Australiens, avec 1,6 mm par an et la nôtre qui est par-dessus et qui prend en compte par rapport à tout ce qui avait été fait jusqu'à présent, la mesure de ces déplacements verticaux, alors que jusqu'à présent, ce qu'on prenait, c'était le modèle géophysique d'ajustement glacio-isostatique.

Autrement dit, on ne prenait pas en compte tous les autres phénomènes, donc, on a écarté beaucoup de mesures qu'on savait affectées par ces mouvements-là. Ici, on a intégré un maximum de mesures avec ces résultats de déplacement proches des marégraphes. On a fait cette reconstruction et on a obtenu un résultat qui concorde avec ceux des collègues américains, publié en 2015 avec un taux de montée qui est moindre sur le 20^e siècle, donc, de l'ordre du millimètre par an au lieu de 1,5 mm par an.

Mais les Américains, ils l'avaient obtenu avec une méthode plutôt probabiliste.

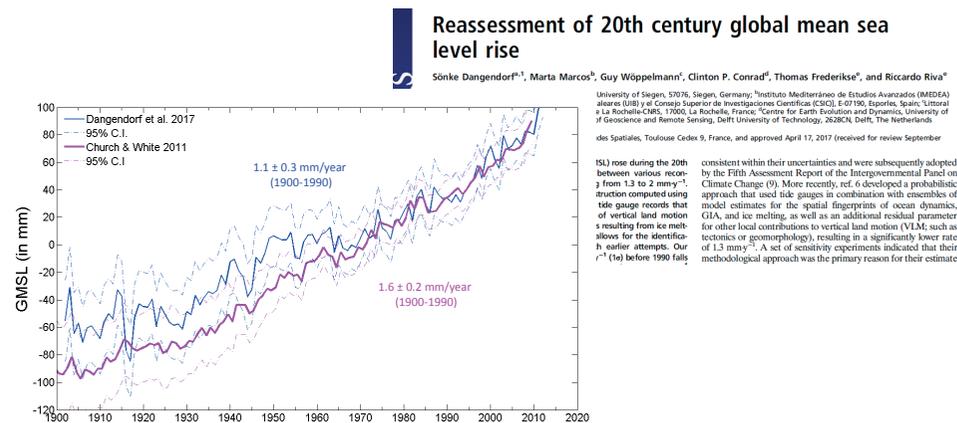
Alors, d'un côté, on voit que le niveau de la mer est monté un peu moins au 20^e siècle. D'un autre côté, ça veut dire qu'il s'est accéléré sur ces 20-25 dernières années, plus que ce qu'on pensait.

Le long des côtes métropolitaines et atlantiques

Les mesures GPS et les résultats des analyses sont disponibles et c'est la contribution de l'Université de La Rochelle à un service d'observation national qui s'appelle « Sonel » que voici.

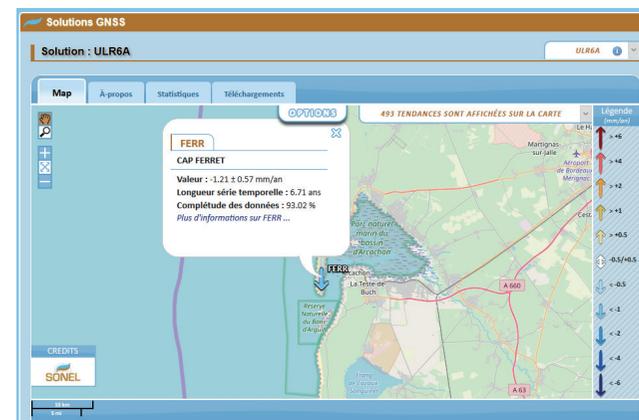
Vous pouvez vous même récupérer ces observations ou éventuellement les résultats de l'analyse de ces observations, et regarder un peu plus dans le détail ce qu'il se passe le long de nos côtes. C'est ce qu'on va faire maintenant.

Prise en compte des déplacements du sol observés par GPS à proximité des marégraphes



Diapo 13 > L'élévation générale du niveau des mers au 20^e siècle

Mesures et résultats GPS disponibles (extraits de www.sonel.org)



Diapo 14 > Le long des côtes métropolitaines et atlantiques (1)

Et voilà ce qu'on a : ce sont plutôt des flèches blanches qui sont entre -0,5 et +0,5 mm par an. C'est plutôt stable. Ces stations marégraphes sont entretenues par des collègues du SHOM et de l'IGN, des partenaires institutionnels et c'est leur contribution dans ce service d'observation.

Et, par exemple, au Cap Ferret près d'Arcachon, on voit qu'il y a une subsidence plutôt du millimètre, soit 1,2 mm par an. Vous pouvez regarder le détail. Ce que je vais faire ici, c'est simplement récupérer ces séries, faire une analyse pour voir les valeurs numériques de tendance.

Comme je le disais, à Brest, aux Sables d'Olonne et à La Rochelle, la tendance est nulle, elle ne sort pas des marges d'incertitude. En revanche, au Cap-Ferret, on a vu, c'est - 1,2 mm par an, mais le signal que l'on a enregistré est plus complexe que ça, puisqu'on a des phénomènes saisonniers annuels dans cet enregistrement-là.

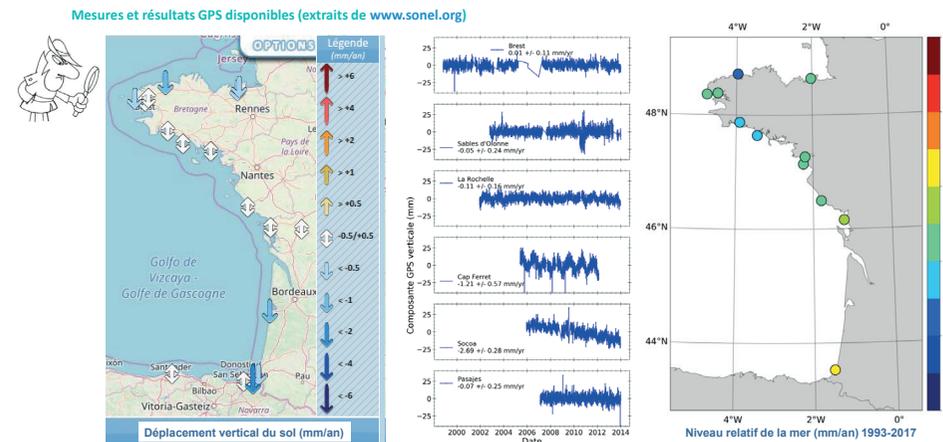
A Socoa et à Saint-Jean-de-Luz, on voit une subsidence qui est assez forte. Et en croisant ces données avec des collègues, on ne comprend pas très bien quelle en est l'origine. On pense que l'origine pourrait être instrumentale, et on dépend un peu du soin qu'on va apporter à cette instrumentation.

Si on croise maintenant avec les données de marégraphie (fig.03) qu'on ressent, c'est la carte qui est ici. Donc sur les 25 dernières années, voyez ici l'échelle des couleurs et effectivement ça colle avec ce que Benoît nous a présenté, avec des taux de montée de l'ordre de 2,5 mm par an, plus importants que sur les 50 dernières années. Je n'ai pas la carte ici, mais c'était environ 1 mm par an de moins et ce que vous voyez, ce sont les endroits où ça monte un peu plus.

Alors ici, on n'est pas à Socoa ou à Saint-Jean-de-Luz, voyez qu'il y a une autre flèche qui est à côté, c'est à Anglet ou Boucaux, je ne me souviens plus si c'est l'un ou l'autre et c'est de l'ordre de 0,5 mm par an de subsidence qu'on observe, et qui viennent de se rajouter aux 2,5 mm par an qu'on observe un petit peu ailleurs, ce qui explique le fait qu'on a un taux qui est un peu plus élevé.

Pour revenir à Saint-Jean-de-Luz, on se posait la question s'il n'y avait pas des artefacts d'analyse, puisque les systèmes spatiaux sont des systèmes assez complexes, et on pourrait avoir un gradient lié à la manière dont on analyse les mesures. C'est pour ça que je suis allé chercher une station qui est à 25 km de Saint-Jean-de-Luz, de l'autre côté de la frontière, Pasajes. Et là, on voit une stabilité assez remarquable sur pratiquement la même période.

C'est pour ça qu'on pense que c'est un problème extrêmement local, lié peut-être à la digue de Socoa.



Diapo 15 > Le long des côtes métropolitaines et atlantiques (2)

Extension de l'information GPS (ponctuelle) par INSAR

Pour conclure, il est important d'insister sur une des limites de ces méthodes-là, c'est le caractère très ponctuel des stations GPS qu'on va placer à côté des marégraphes, puisqu'on a vu que ces phénomènes de déplacements du sol peuvent être très localisés.

Il y a bien sûr d'autres méthodes, Benoît les a évoquées pour les glaces et on peut les appliquer en terre dénudée de glace : c'est ce qu'on appelle l'interférométrie radar.

Je ne vais pas rentrer dans les détails, mais on a une thèse de doctorat avec Cyril Poitevin sur une étude de cas où on sait que ça ne devrait pas bouger. Brest est l'exemple qu'on a pris.

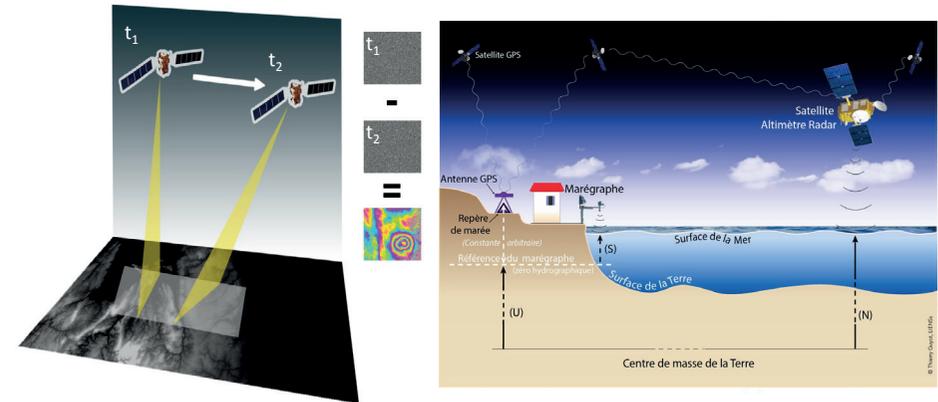
Et voilà les résultats qu'obtient Cyril sur la ville de Brest (diapo16.bis). Cette méthode a un avantage, c'est qu'on a une cartographie de ces mouvements-là. Son désavantage, c'est que c'est relatif à un pixel qu'on va choisir dans ces images-là.

Donc, le pixel qu'on a choisi, c'est la station GPS ou proche de la station GPS puisqu'on sait que le moment est stable et en faisant cette combinaison entre les mesures GPS et l'INSAR, on a cette cartographie sur la ville de Brest qui est effectivement globalement instable, mais il y a quelques zones où on voit des instabilités du sol et c'est en particulier cette zone-là de la ville de Brest. Alors, simplement pour montrer à quoi ça correspond, ça correspond au port de commerce et à des remblais.

Alors, ici aussi, c'est le port militaire et le port militaire est beaucoup plus ancien que le port de commerce et ici, il n'y a plus de tassement. En tout cas, ça colle avec ce qu'on observe avec le GPS.

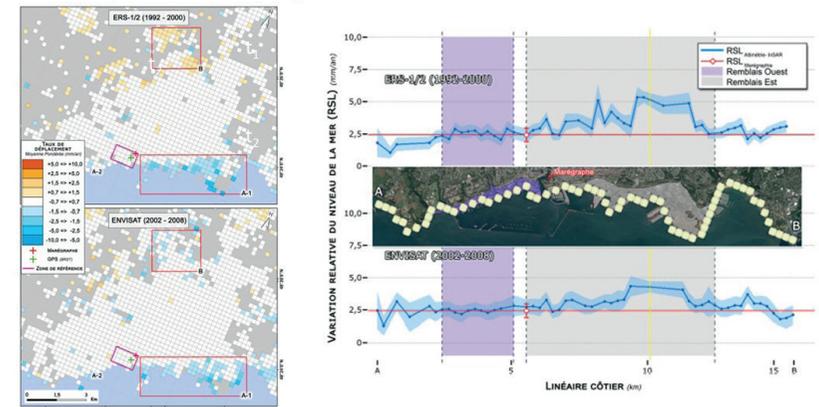
Et ce qu'on peut faire avec cette méthode, c'est regarder le long de la côte, bien au-delà de la station GPS et du marégraphe, ce qui se passe en combinant l'information du marégraphe et l'information des satellites pour arriver ici à un taux qui correspond à celui du marégraphe et du GPS de 2,5 mm par an. Ce qui permet de voir qu'ici, dans cette partie-là de la ville de Brest, le taux est beaucoup plus important et probablement lié à ce tassement-là. Donc voilà, ça clôt mon exposé...

Etude de cas à Brest (thèse de doctorat, C. Poitevin)



Diapo 16 > Extension de l'information GPS (ponctuelle) par INSAR

Etude de cas à Brest (thèse de doctorat, C. Poitevin)



Diapo 16 bis > Extension de l'information GPS (ponctuelle) par INSAR