

## Rapport de Projet Personnel de Recherche

---

### Montée des Eaux

---



**Tuteur :** Yann Ourmières  
**Laboratoire :** MIO  
**Auteur :** Violette Lère

## Table des matières

<b>1</b>	<b>Préambule</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Données / Observations</b>	<b>3</b>
2.1	Définitions . . . . .	3
2.2	Études des variations du niveau de la mer . . . . .	3
2.2.1	Passé . . . . .	3
2.2.2	XXe siècle . . . . .	4
2.2.3	XXIe siècle . . . . .	4
2.3	Constatation d'une accélération de la montée des eaux . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Causes de la montée des eaux</b>	<b>7</b>
3.1	Changement de la composition atmosphérique . . . . .	7
3.2	Causes de la montée des eaux . . . . .	7
3.2.1	Dilatations . . . . .	7
3.2.2	Fonte des glaces . . . . .	8
3.2.3	Eaux continentales . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Disparités régionales</b>	<b>9</b>
4.1	Variabilité naturelle : cause principale des disparités régionales . . . . .	9
4.1.1	Circulation océanique . . . . .	9
4.1.2	Phénomène climatique . . . . .	10
4.1.3	Pression atmosphérique . . . . .	11
4.2	Perturbation de la variabilité naturelle . . . . .	11
4.2.1	Augmentation de la dilatation thermique . . . . .	11
4.2.2	Perturbation de la circulation océanique . . . . .	11
4.2.3	Aggravation des phénomènes climatiques . . . . .	11
4.3	Autres facteurs . . . . .	12
4.3.1	Surrection . . . . .	12
4.3.2	Subsidence . . . . .	12
4.3.3	Altération des fonds marins . . . . .	12
<b>5</b>	<b>Études de cas</b>	<b>13</b>
5.1	Zones deltaïques : Nil, Égypte . . . . .	13
5.2	État atollien : République des Kiribati . . . . .	13
<b>6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Remerciements</b>	<b>15</b>
<b>8</b>	<b>Bibliographie</b>	<b>15</b>

## 1 Préambule

Enjeu majeur du XXI<sup>e</sup> siècle, le réchauffement climatique a de multiples répercussions à l'échelle planétaire. La montée des eaux en est l'une des conséquences principales, et engendre d'importants dégâts sociaux-économiques.

Le niveau moyen global des mers s'élève en s'accélérant en raison de la fonte des glaciers continentaux et de l'expansion thermique. Néanmoins, bien que ce problème soit mondial, l'élévation n'est pas uniforme et peut varier d'environ  $\pm 30\%$  selon les régions en raison des courants océaniques mais aussi des phénomènes météorologiques (sur lesquels joue aussi le réchauffement climatique).

La population mondiale ne fait pas, non plus, face aux mêmes difficultés, et n'est pas confrontée aux mêmes problèmes qu'engendre cette montée des eaux, en raison notamment de sa position géographique, de la composition géologique de ses sols ou encore de sa situation économique.

Comme l'explique le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) l'impact anthropique en est le principal facteur. Dans leurs différents rapports, la projection de l'élévation des eaux dépend du scénario d'émissions de gaz à effet de serre adopté dans le futur. Plusieurs trajectoires d'émissions, de la plus optimiste à la plus alarmante sont proposées, faisant varier, d'ici 2100, l'évolution de 0,43m (RCP2.6<sup>\*</sup>) à 0,84 m (RCP8.5), par rapport à la période 1986-2005.

La montée des eaux est donc indéniable quel que soit le scénario suivi. Il faut donc comprendre comment ce système planétaire fonctionne afin de trouver des solutions d'adaptation rapide et nécessaire pour limiter l'exposition des territoires menacés.

## 2 Données / Observations

### 2.1 Définitions

On appelle communément le niveau de la mer la hauteur moyenne des océans, définie comme l'altitude moyenne (médiane) entre le niveau moyen des marées basses et des marées hautes en un point donné. Ainsi cette moyenne s'établit sur une échelle annuelle.

En réalité, c'est un peu plus complexe : les scientifiques s'appuient sur les notions d'ellipsoïde de référence et géoïde. Le premier prend en compte la forme du globe et non ses reliefs. Il décrit le globe comme une ellipse dont le niveau global est celui de l'eau. Tandis que le géoïde représente une surface terrestre soumise à l'équipotentialité de la gravité. Autrement dit, dans l'eau, on le considère comme la zone de repos de l'océan. On utilise ces notions afin de définir l'altitude zéro. Elle s'apparenterait au géoïde.

### 2.2 Études des variations du niveau de la mer

#### 2.2.1 Passé

Il faut savoir que le niveau de la mer n'a jamais été constant.

Pour ne parler que de la période récente, au cours du dernier million d'années, on sait qu'il y a eu une alternance entre des périodes froides, appelées périodes glaciaires, et des périodes plus chaudes, appelées interglaciaires, durant lesquelles le niveau de la mer baissait en raison de formation de calottes de glace, puis augmentait lors de leur fonte partielle.

Nous savons aujourd'hui, grâce notamment aux archives sédimentaires (comme les coraux fossiles, les sédiments marins, les marais littoraux), aux indices archéologiques (comme les structures portuaires) ou bien géologiques et paléoenvironnementaux (comme l'évaluation de la température et de la salinité en subsurface), que le niveau de la mer est resté globalement constant depuis 4000 ans, jusqu'au début du XX<sup>e</sup> siècle. Les scientifiques estimaient une variation de 0,1 à 0,3 mm/an.

---

\*. RCP : (Representative Concentration Pathways), profils représentatifs d'évolution de concentration de gaz à effet de serre

### 2.2.2 XXe siècle

C'est à partir de la fin du XIXe siècle que les marégraphes ont fait leur apparition.

En France, celui de Marseille a effectué ses premières mesures en 1885. Bien que le relevé des mesures soit plus accessible, la complexité réside notamment dans l'analyse des données. Les marégraphes permettent d'estimer le niveau moyen de l'eau en un point donné. La difficulté est qu'ils enregistrent aussi les mouvements verticaux du sol, car ils sont fixés à celui-ci. Il peut s'agir d'éruptions volcaniques, mais aussi de l'enfoncement des sols en raison du poids des sédiments dans les deltas de grands fleuves, ou bien encore d'un rebond postglaciaire.

Bien que ces mouvements ne permettent pas une précision irréfutable de la mesure, ils ont donc permis d'avoir un suivi des évolutions passées, donnant l'occasion au GIEC de calculer en 1995 un rythme moyen de 1 à 2 mm par an depuis le début du XXe siècle, soit 15 cm sur le siècle.

### 2.2.3 XXIe siècle

C'est en 1993 que naissent les premiers satellites altimétriques destinés à la mesure du niveau de la mer. Ces mesures, bien plus précises, offrent une étude quasi globale des surfaces océaniques en seulement quelques jours (10 jours pour les satellites Topex/Poseidon<sup>†</sup> et Jason<sup>‡</sup>), mais permettent aussi une abstraction totale des mouvements possibles de la croûte terrestre. Ils mesurent la hauteur des océans avec une très grande précision et permettent donc d'en déduire l'évolution du niveau de la mer avec une exactitude de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre par an.

Les mesures altimétriques reposent sur le fonctionnement d'un radar embarqué sur le satellite. Celui-ci émet un signal électromagnétique de très haute fréquence (plus de 1700 impulsions par seconde) à la verticale et en direction de la surface des océans. Le satellite reçoit ensuite l'écho réfléchi par la surface de la mer.

Puisque la vitesse de l'onde se propage à la vitesse de la lumière ( $C$ ), la mesure de la durée ( $\Delta t$ ) entre l'émission et la réception du signal permet de déduire la distance ( $R_{\text{mes}}$ ) séparant le satellite de la surface de l'océan :

$$R_{\text{mes}} = \frac{C \times \Delta t}{2} \quad (1)$$

Il faut toutefois noter que la distance  $R_{\text{mes}}$  obtenue n'est pas tout à fait exacte. En effet, le signal, lors de sa propagation, subit des ralentissements, dus, notamment, à l'inhomogénéité de l'atmosphère, et à des effets météorologiques tels que le taux d'humidité et d'ionisation. L'ionosphère, une couche peu dense présentant des électrons libres, va provoquer un retard de propagation de l'onde. Le signal traverse ensuite la troposphère, qui elle aussi modifie le signal.

Ainsi après avoir appliqué les corrections nécessaires pour prendre en compte ces phénomènes physiques, nous obtenons la distance réelle :

$$R = R_{\text{mes}} - \sum \Delta C_i \quad (2)$$

avec  $\Delta C_i$  les corrections prenant en compte ces retards de propagation.

Enfin, afin de déterminer la hauteur de la mer ("Sea Surface Height",  $SSH$  ci-après), un système de positionnement (récepteur GPS ou DORIS<sup>§</sup>) est embarqué à bord du satellite, permettant de déterminer avec précision l'altitude du satellite  $S$  (son orbite) par rapport à un ellipsoïde de référence.

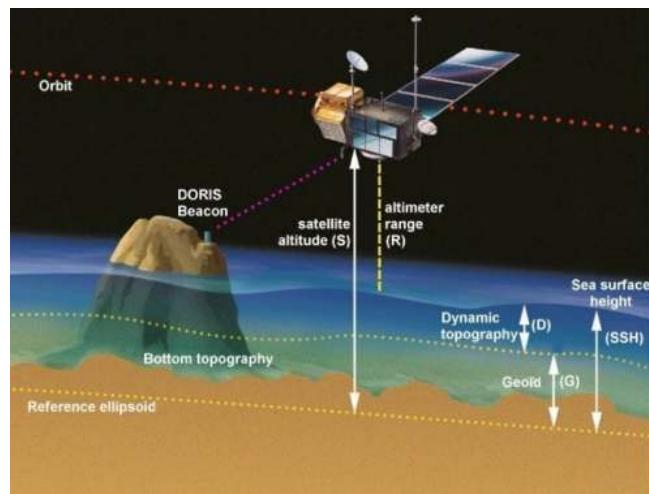
Il suffit ensuite de soustraire la distance de l'onde à la hauteur du satellite. Nous obtenons donc :

$$SSH = (S - R) \quad (3)$$

<sup>†</sup>. Topex/Poseidons : satellite d'océanographie développé par la NASA et le CNES, lancé en 1992

<sup>‡</sup>. Jason : famille de trois satellites développés par la NASA et le CNES, lancé de 2001 à 2016

<sup>§</sup>. DORIS : système de détermination et de positionnement précis de l'orbite



Mesure de la SSH par altimétrie

Source : AVISO ([www.aviso.altimetry.fr](http://www.aviso.altimetry.fr))

Afin de déduire l'anomalie de hauteur de mer ("Sea Level Anomaly", *SLA* ci-après) représentant la partie variable de la topographie dynamique ("Absolute Dynamic Topography", noté *ADT*), elle-même traduisant les hauteurs de mer exprimées par rapport au géoïde à un instant *t*, représentant la présence des courants, la densité inhomogène des masses d'eau et leurs mouvements, on calcule la *MSS* ("Mean Sea Surface"), c'est-à-dire la moyenne temporelle de la *SSH* sur une période de 20 ans.

Nous soustrayons ces deux grandeurs pour déterminer l'écart des mesures de hauteur des mers :

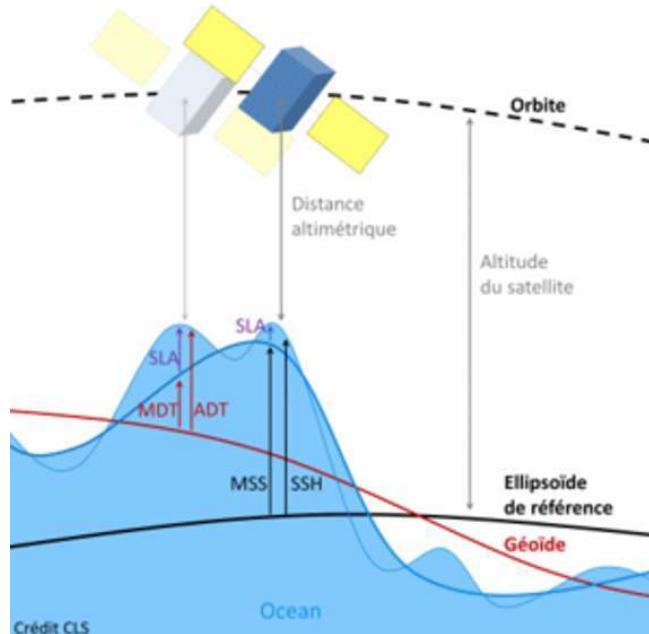
$$SLA = SSH - MSS \quad (4)$$

Nous définissons aussi la topographie dynamique moyenne ("Mean Dynamic Topography", *MDT*) qui est la hauteur moyenne de l'océan par rapport au géoïde. Cette moyenne est calculée sur une période de référence suffisamment grande pour éviter de prendre en compte les fluctuations interannuelles. Elle reflète la circulation océanique moyenne.

Ainsi :

$$ADT = SLAp + MDTp \quad (5)$$

(avec *p* une période de référence)



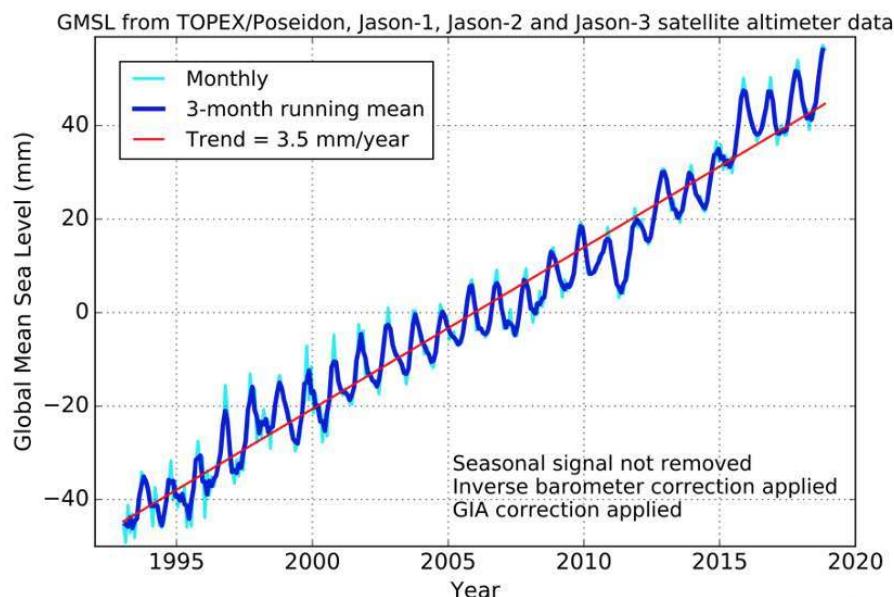
Différentes notions de hauteurs de mer

Source : <https://www.odatis-ocean.fr/ressources/ressources-thematiques/disciplines-de-recherche/physique-de-l-ocean/hauteurs-de-mer>

Ces mesures altimétriques sont aussi couplées avec d'autres analyses :

- L'étude des températures et de la salinité, grâce au système Argo ¶ (généralement lorsque la salinité d'une mer augmente, c'est le signe d'une évaporation plus importante)
- Les variations de masses d'eau grâce à la gravimétrie spatiale GRACE ||
- L'inventaire de masses des calottes polaires avec l'interférométrie radar \*\*
- Ou encore les mesures de terrain et l'imagerie spatiale afin de surveiller la fonte des glaciers

Tout ceci donne une vision globale et plus complète des évolutions présentes, permettant d'estimer une élévation moyenne sur le globe de  $3,2 \pm 0,4$  mm/an de 1993 à 2014. Le dernier rapport du GIEC tend, néanmoins, à valider les projections antérieures les plus pessimistes, c'est-à-dire 3,6mm/an (sur la période 2006-2015).



Élévation moyenne sur le globe du niveau de la mer de 1995 à 2020  
grâce aux satellites altimétriques

Source : NASA

### 2.3 Constatation d'une accélération de la montée des eaux

Ainsi, on constate que cette élévation récente du niveau de l'eau est deux fois supérieure à celle mesurée par les marégraphes durant le dernier siècle, et dix fois depuis les premiers relevés possibles. En effet, elle a augmenté de 23 cm depuis 1880, dont 8 cm au cours des 25 dernières années.

On observe aussi grâce aux satellites altimétriques, recouvrant la totalité du domaine océanique, une certaine variabilité régionale de cette hausse : elle n'est en effet pas homogène.

Nous verrons plus loin qu'elle est, pour l'instant, causée par la variabilité naturelle interne au système climatique, mais que le réchauffement global provoquera, dans le futur, d'importantes disparités régionales de la hausse de la mer.

¶. Argo : système de balises qui plongent en profondeur pour recueillir les données de température et salinité

||. GRACE : Système de deux satellites altimétriques, lancés en 2002, qui mesurent les changements de masse des océans

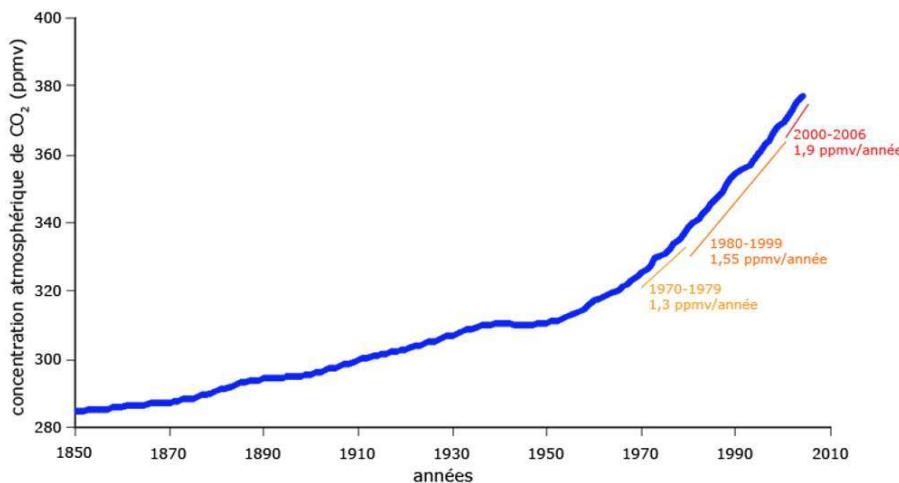
\*\*. Interférométrie radar : mesure du délai relatif entre les observations d'un même point donné au sol observé depuis deux positions légèrement différentes

### 3 Causes de la montée des eaux

#### 3.1 Changement de la composition atmosphérique

Même si la variabilité de l'effet de serre <sup>††</sup> et par conséquent celle de l'albédo <sup>‡‡</sup> ne sont pas un phénomène nouveau, on observe un changement significatif de la composition globale de l'atmosphère depuis le début du XXe en raison des activités anthropiques. Par exemple, les particules de CO<sub>2</sub> dans l'air ont augmenté de 25% (Ppmv <sup>§§</sup>) depuis la révolution industrielle.

Aujourd'hui, les émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'utilisation des énergies fossiles augmentent au-delà des prévisions les plus pessimistes des différents scénarios du GIEC établis en 2000. Par exemple, en 2006, les émissions ont atteint 8,4 milliards de tonnes de carbone, alors que les pires scénarios prévoient 8 milliards de tonnes.



Sources : NOAA 2007; Canadell et al. 2007, PNAS

#### Évolution de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone entre 1850 et 2006

Même si le dioxyde de carbone est le principal responsable (à hauteur de 55% durant les années 1980), d'autres gaz contribuent également à l'augmentation de l'effet de serre, comme le méthane (15%), dont la concentration aurait plus que doublé en quelques siècles.

Ainsi les activités anthropiques déséquilibrent l'effet de serre naturel. Puisqu'ils sont rejetés plus rapidement que la Terre ne peut les absorber, leur concentration croît, provoquant l'augmentation de la température moyenne de l'enveloppe de la planète.

Il est aussi important d'ajouter que même si nous arrivions à réduire drastiquement, voire annuler nos émissions maintenant, celles d'aujourd'hui impacteront le climat encore longtemps.

#### 3.2 Causes de la montée des eaux

En réponse au changement climatique, on fait face à de multiples conséquences, notamment la hausse du niveau de l'eau. Elle est causée par plusieurs paramètres que nous allons détailler maintenant.

##### 3.2.1 Dilatations

**Température :** En s'appuyant sur des relevés de température de la mer, mesurées sur les 40 à 50 dernières années, et récemment avec le système Argo, on observe que 93% de l'énergie en surplus due aux émissions de gaz à effet de serre, est stockée dans les océans. C'est un réservoir à carbone très efficace, soit 15 à 20 fois plus que l'atmosphère et les terres émergées.

<sup>††</sup>. Effet de serre : phénomène naturel d'absorption par les gaz se trouvant dans l'atmosphère, des rayonnements émis par la Terre après les avoir reçus par le Soleil

<sup>‡‡</sup>. Albédo : indicateur de réfléchissement d'une surface (0% la surface absorbe, 100% la surface réfléchie)

<sup>§§</sup>. Ppmv : partie par million en volume (1 ppmv = 1  $\mu$ L/L)

Mais au-delà des conséquences que cela a sur la biodiversité marine, on sait que lorsqu'un volume d'eau se réchauffe, les molécules vibrent plus en raison de la température, donc prennent plus de place : c'est ce qu'on appelle la dilatation thermique. Il est possible de calculer les variations de niveau de la mer dues à cette expansion thermique, grâce à la formule suivante :

$$\Delta H = \alpha \times H_1 \times \Delta T \quad (6)$$

$\Delta H$  : Variation du niveau de la mer

$\alpha$  : Coefficient de dilatation thermique = constante ( $\alpha = 2.6 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ) pour l'eau

$H_1$  : Hauteur initiale de l'eau de mer

$\Delta T$  : Variation de la température

C'est ce qu'on appelle la variation de "hauteur stérique".

**Salinité :** Cependant, celle-ci peut aussi être influencée par la composante "halostérique" c'est-à-dire la quantité de sel présente dans la colonne d'eau. Plus la concentration de sel est élevée, plus la densité augmente et plus la colonne d'eau se contracte. À l'inverse, les eaux légères occupent un volume plus grand : si la salinité diminue, la densité baisse. L'eau va avoir tendance à se dilater et le niveau de la mer va augmenter.

Ajoutons toutefois que la variation de salinité reste surtout un indicateur des apports d'eaux douces dans l'océan, et donc de sa variation de masse. Ainsi ce facteur halostérique n'a pas un grand impact sur la variabilité de la *SSH*.

Bien que l'expansion thermique participe de 1,5mm/an à la hausse des océans de 1993 à 2003, et de 0,9 mm/an de 2005 à 2013, c'est bien ce facteur qui reste l'une des causes les plus importantes de cette hausse. Depuis 1990-93, on estime qu'elle en est responsable de 30 à 40%.

### 3.2.2 Fonte des glaces

Un second facteur tout aussi important est la fonte des glaciers et des calottes polaires.

Ce qu'il faut bien comprendre c'est que la fonte de la banquise ne participe pas à la *SSH* : puisqu'elle s'est formée à partir d'eau de mer, sa fonte n'ajoute pas d'eau dans les océans. La partie immergée d'un glaçon qui est à la surface de l'eau occupe le même volume que celui occupé par toute la glace une fois fondue. C'est une conséquence de la poussée d'Archimède, qui stipule que tout corps immergé reçoit une poussée verticale égale au poids du volume de fluide déplacé.

Ce sont donc les glaciers d'eaux douces (glaciers des montagnes, calottes polaires), formés à partir d'amas de glaces continentales, présentes sur les continents, qui participent à la hausse du niveau de l'eau, et se déversent dans les océans en fondant.

Bien que nous soyons dans une ère interglaciaire depuis 11 600 ans, appelée l'Holocène, il a existé des périodes où le climat s'est refroidit. On appelle ces épisodes des petits âges de glace ou petits âges glaciaires. Il y en a eu notamment un qui s'est achevé au milieu du XIXe siècle, entraînant un début de fonte des glaces.

Mais nous savons, depuis 1980-90, que celle-ci s'est accélérée, en raison des activités anthropiques. En effet, sur les 30 dernières années, la perte de masse très importante au Groenland s'est accélérée : elle est passée de 140 milliards de tonnes par an (Gt/an) de 1992 à 2011, à 370 Gt/an de 2009 à 2012. Cela s'explique par l'augmentation de la fonte de la calotte en surface, mais aussi par l'échauffement des eaux en ses alentours, entraînant l'augmentation de présence d'icebergs.

Ainsi de 1993 à 2010, d'après les données altimétriques, les glaciers et les calottes seraient responsables à hauteur de  $0,8 \pm 0,4$  mm/an de la hausse du niveau des mers. Depuis 1990, leur fonte se serait élevée de 57%, et 58% des pertes de glace émaneraient de l'hémisphère Nord, contre 42% de l'hémisphère Sud.

### 3.2.3 Eaux continentales

Les activités humaines ont aussi un effet sur les stocks d'eaux continentales. Certaines d'entre elles ont une légère influence, comme la création de barrages (baisse du niveau de la mer), ou bien le fait de

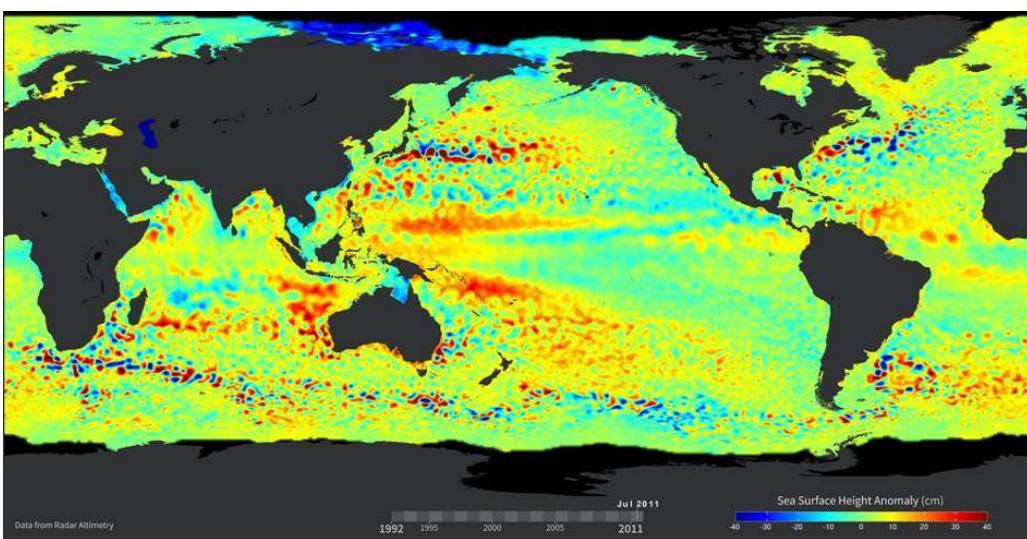
récolter de l'eau dans les nappes souterraines continentales (hausse du niveau).

Et bien que ces deux effets se compensent en termes de variation, la récolte d'eau des nappes a augmenté ces dernières années, participant légèrement à la hausse globale des océans. Toutefois, cela reste très local, et assez minoritaire par rapport aux autres facteurs précédemment évoqués.

Ainsi, toutes ces causes, participant plus ou moins à la hausse globale du niveau de l'eau, expliquent bien cette accélération.

## 4 Disparités régionales

Comme évoqué précédemment grâce aux outils satellitaires, nous savons maintenant que cette croissance n'est pas homogène sur l'ensemble du globe.



Anomalies de la SSH, 1992-2011

Source : NASA

Plusieurs raisons à cela :

### 4.1 Variabilité naturelle : cause principale des disparités régionales

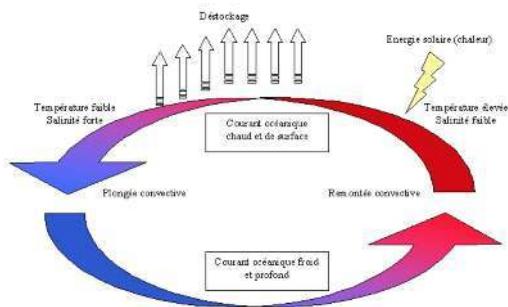
#### 4.1.1 Circulation océanique

Le déplacement des masses d'eaux est régi par une circulation océanique appelée circulation thermohaline. Pour comprendre comment cette boucle océanique est mise en mouvement il faut étudier les différences de densité de l'eau qui sont contrôlées par la température et la salinité.

En raison de la forme sphérique du globe terrestre, on constate un excédant solaire à l'équateur, et un déficit solaire aux pôles. A l'équateur, le rayon émis par le Soleil arrive perpendiculairement sur la Terre, contrairement aux pôles, et l'énergie emmagasinée y est plus importante, puisqu'elle est absorbée par une plus petite surface.

Les eaux sont donc plus chaudes à l'équateur qu'aux pôles, ce qui va induire un mouvement. Lorsque l'eau chaude monte aux pôles, peu dense, celle-ci se déplace en surface. Puis elle se refroidit et forme de la glace marine. Le sel ne gelant pas, l'eau liquide restante est donc bien plus salée. La densité augmente, et l'eau commence à couler. Les eaux froides et denses se dirigent, à leur tour, vers l'équateur en passant par les fonds marins. Cela initie le mouvement des courants océaniques profonds qui entraîne le tapis roulant mondial.

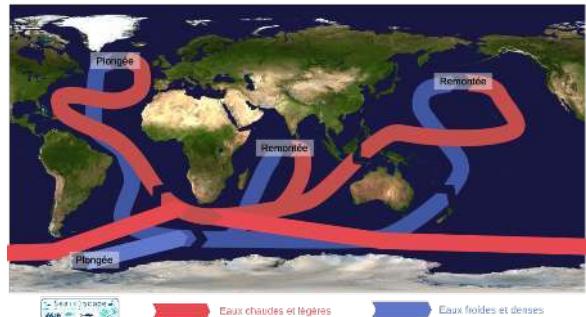
On le comprend, la répartition de stockage de l'énergie dans les océans est inhomogène. Due à la circulation et aux courants océaniques, la chaleur de l'eau n'est pas uniforme sur l'ensemble du globe et peut causer une hausse plus importante dans certaines régions en raison de la dilatation thermique, comme c'est le cas dans l'ouest du Pacifique tropical.



### Mouvement des masses d'eaux

Source :

<https://acces.enslyon.fr/acces/thematiques/paleo/systemclim/gulf-stream/images-gulf-stream/images-dossier-scientifique/principescircuthermohal/view>



### Circulation thermohaline mondiale

Source :

<https://seaescape.fr/blog/2019/11/26/circulation-oceanique/>

Certains courants de surface participent aussi à cette inégalité de stockage de l'énergie.

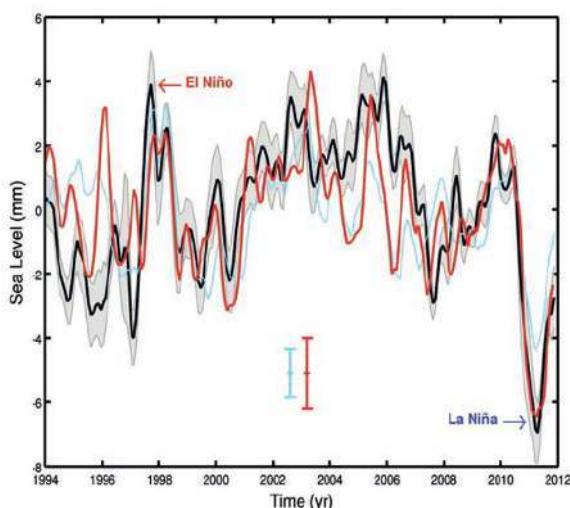
Les gyres sont des tourbillons résultant des vents mais aussi de la force de Coriolis. En raison de la rotation de la Terre, l'équateur se déplace plus vite que les pôles, ce qui a pour effet de dévier la trajectoire d'un corps en mouvement. Les courants se retrouvent donc déviés à droite dans l'hémisphère Nord et à gauche dans l'hémisphère Sud.

La direction résultante, appelée "transport d'Ekman" est perpendiculaire à la direction du vent, à droite dans l'hémisphère Nord et à gauche dans l'hémisphère Sud.

Ainsi la circulation océanique est complexe et induit une inhomogénéité de la répartition de l'énergie, provoquant une certaine variabilité de la hausse mondiale.

#### 4.1.2 Phénomène climatique

Un autre facteur participant à cette variabilité naturelle sont les phénomènes climatiques. En effet les épisodes météorologiques, comme El Niño ou La Niña, ont un impact sur cette hausse (de 3 à 4mm), entraînant une variation de masse des océans. La hausse est positive avec le 1er, car durant El Niño il pleut généralement plus au-dessus des océans, alors que pendant La Niña il pleut plus sur les continents, engendrant une baisse du niveau de l'eau, comme nous avons pu l'observer en 2011.



En noir : Variations du niveau moyen global de la mer

En bleu : Effet des eaux continentales

En rouge : Somme de l'effet des eaux continentales et de l'expansion thermique de l'océan (sans la tendance)

Source : Legos

#### Variation du niveau d'eau global moyen de 1993 à 2011

De plus, durant un épisode d'El Niño, les vents alizés, habituellement orientés d'est en ouest le long de l'équateur, s'affaiblissent ou s'inversent, entraînant vers l'est les eaux chaudes de l'ouest du Pacifique. Pendant les périodes La Niña, les vents normaux d'est en ouest deviennent plus forts, poussant les

eaux chaudes plus à l'ouest. Cela perturbe les courants océaniques et engendrent aussi une variation importante de la température de l'eau.

On parle généralement d'"année La Niña" quand la température est anormalement froide, et d'"année El Niño" quand elle est plus chaude que la moyenne (la variation pouvant atteindre 10°C). La température augmentant, l'eau se dilate et favorise une hausse du niveau (dilatation thermique).

#### 4.1.3 Pression atmosphérique

Enfin, un autre facteur pouvant jouer sur cette variabilité naturelle est la pression atmosphérique. En effet, le poids de l'atmosphère est mesuré par la pression atmosphérique à la surface de l'océan. Plus la pression atmosphérique est grande, plus le poids exercé sur l'océan sera important.

Lors d'un anticyclone, la pression atmosphérique, plus élevée, va peser sur l'océan. À l'inverse, lors d'une dépression, la pression est plus faible que la moyenne, et l'eau va avoir tendance à se détendre et à monter. Cela peut induire une variation de 20 à 30 cm du niveau de la mer.

Sachant que la pression atmosphérique moyenne est de 1015 hPa, on estime que chaque hPa de perdu ou de gagné représente 1cm de variation de la *SSH*.

### 4.2 Perturbation de la variabilité naturelle

Bien que la variabilité naturelle soit le facteur principal de cette disparité régionale, les scientifiques prévoient que le réchauffement climatique pourrait perturber cette variabilité naturelle, et augmenterait l'inhomogénéité de la hausse du niveau de l'eau.

#### 4.2.1 Augmentation de la dilatation thermique

Tout d'abord, puisque la température moyenne mondiale augmente, l'eau se réchauffe. Et on constate que les zones chaudes vont avoir tendance à se réchauffer plus facilement que les eaux froides, ce qui va impliquer une dilatation thermique plus prononcée dans certaines régions du globe.

#### 4.2.2 Perturbation de la circulation océanique

Ensuite, en raison de l'augmentation indéniable de la température, l'évaporation à la surface des océans sera plus importante, augmentant la densité de l'eau, ce que pourrait perturber la circulation océanique mondiale.

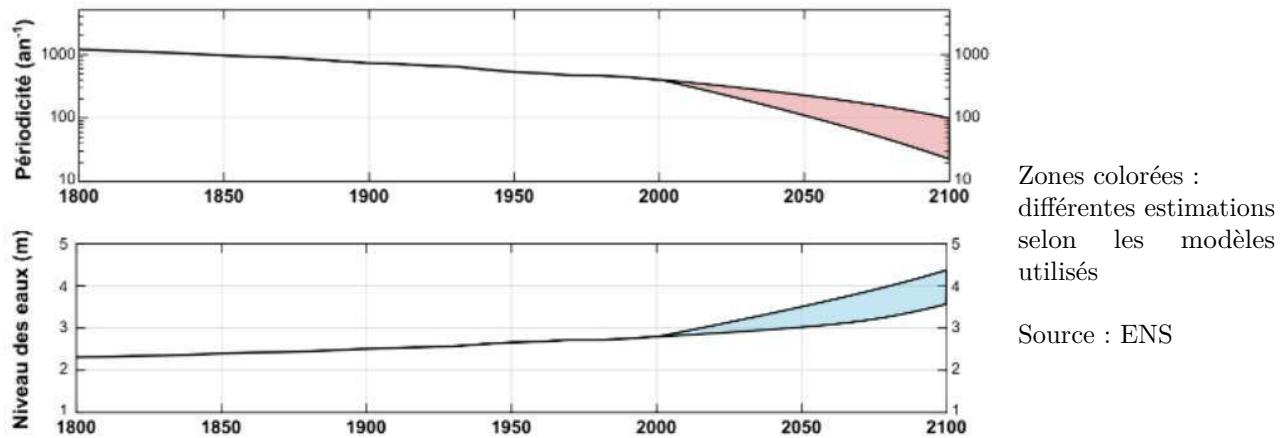
Cette circulation thermohaline pourrait aussi être ralentie en raison de l'apport des glaces continentales. L'afflux d'eau douce chaude à la surface de la mer pourrait bloquer la formation de glace de mer, perturbant ainsi la quantité d'eau froide et salée et accentuant encore l'élévation du niveau de la mer. Toutefois, notons qu'à ce jour, il reste difficile de déterminer l'impact que le réchauffement climatique va avoir sur la circulation mondiale, et beaucoup d'études sont en cours sur ce sujet.

#### 4.2.3 Aggravation des phénomènes climatiques

Le réchauffement climatique pourrait aussi causer une augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes comme les inondations, ou El Niño et La Niña.

En effet, une atmosphère plus chaude retient plus de vapeur d'eau et entraîne des averses plus fortes. Selon le rapport du GIEC, chaque degré supplémentaire de réchauffement équivaut à une augmentation de 7% des précipitations lors des tempêtes et orages. Le changement climatique peut aussi affecter les dynamiques au sein même des tempêtes, et faire encore augmenter les précipitations.

Un événement climatique extrême, comme l'ouragan Sandy, qui en 2012 avait grandement perturbé le fonctionnement de la côte Est des États-Unis en provoquant des inondations (l'eau était montée de 2,8m dans la ville de New-York), avait une probabilité, dans les années 2000, de se produire tous les 398 ans. En 2100, il sera de 3 à 17 fois plus probable et de plus en plus intense au cours du siècle, avec des hauteurs d'eau atteignant entre 3,5 et 4,3 mètres selon les modèles.



### Augmentation de la fréquence et de l'intensité des ouragans au cours du siècle à venir

#### 4.3 Autres facteurs

##### 4.3.1 Surrection

Au-delà de la variation naturelle et de sa possible perturbation, on connaît d'autres phénomènes pouvant jouer sur les disparités régionales, comme par exemple la surrection des terres, c'est-à-dire une élévation de la croûte terrestre.

Cela peut être lié au phénomène du rebond post-glaciaire. Après la fonte des calottes de glace sur les terres émergées, on observe une hausse de la surface terrestre. C'est le cas notamment de l'Islande ou de la Scandinavie, où l'on mesure une baisse du niveau de la mer Baltique de 4mm/an.

Mais l'on constate aussi une surrection des terres lors du rapprochement de deux plaques tectoniques pouvant causer une élévation de l'une d'entre elles. C'est le cas sur la côte de l'état de Washington et de l'Oregon, où l'on observe une hausse de 2 à 3mm/an.

##### 4.3.2 Subsidence

Inversement, un autre facteur qui engendre des inégalités face à la montée des eaux, est la subsidence, c'est à dire un affaissement des terres.

Cela peut être dû à une plaque tectonique, ou à des réarrangements des sédiments, notamment dans les deltas.

Mais on constate aujourd'hui que 73% des zones en subsidence se situent dans des régions cultivées ou urbaines. Cela s'explique par le poids des villes, mais aussi par l'exploitation excessive des sous-sols. Par exemple lors des pompages d'eau, la pression qu'exerçait cette eau dans ce milieu confiné diminue et entraîne la fermeture de ces espaces poreux et une compaction des sols.

On le constate notamment dans des villes d'Asie, au Japon avec la ville d'Osaka (2,8 m de subsidence entre 1935 et 1995) ou Tokyo (5m entre 1930 et 1995). On le voit aussi à Bangkok en Thaïlande ou Dacca, la capitale du Bangladesh, qui s'enfoncent sous leur propre poids. (1 à 2cm/an de 1993 à 2012, pour Dacca)

##### 4.3.3 Altération des fonds marins

Enfin, l'apport d'eaux continentales dans les océans entraîne un transfert de masse, qui peut, non seulement impacter la circulation océanique, mais modifier la répartition des charges et altérer l'allure des fonds marins.

Toutefois, ce facteur reste indétectable dans les mesures obtenues, puisqu'il est masqué par la forte hétérogénéité de l'expansion thermique.

## 5 Études de cas

Pour terminer, dans cette dernière partie nous allons nous intéresser à deux zones géographiques particulièrement menacées par la montée des eaux.

### 5.1 Zones deltaïques : Nil, Égypte

Tout d'abord, comme évoqué précédemment, certaines zones subissent le phénomène de subsidence. C'est le cas notamment dans les zones deltaïques. En effet, puisque les deltas sont formés par l'accumulation de sédiments fluviaux non consolidés et de matière organique poreuse, ils sont donc très sujets à la compaction.

Cependant, dans de nombreux cas, ce processus naturel de construction deltaïque a été perturbé par des réductions de l'approvisionnement en sédiments fluviaux en raison de la construction des 845000 barrages mondiaux.

Ainsi, en raison de ces obstacles, il n'y a jamais eu aussi peu de sédiments atteignant les littoraux.

Si on étudie le cas du delta du Nil en Égypte, l'affaissement lié à la dérivation des sédiments par le barrage d'Assouan, à l'extraction d'eau et de gaz naturel, et le fait qu'il soit situé à 1,5 mètre au-dessus du niveau de la mer, rend cette région très vulnérable aux inondations côtières. Et, bien que le delta ne représente que 2% de la superficie totale de l'Égypte, il abritait 41% de sa population en 2006, et contient plus de 63% des terres cultivées. De plus, premier pays aquacole d'Afrique, l'essentiel (60%) des piscicultures d'Egypte se trouvent dans le delta.

Les inondations côtières et la salinisation des lagunes d'eau douce affecteraient donc gravement les pêcheries et la biodiversité, et plus largement l'économie du pays.

Sans mesures d'adaptation, on estime que 2660 km<sup>2</sup> du delta nord seront inondés d'ici 2100 pour une hausse de 0,44 m (RCP2.6). Le gouvernement égyptien a engagé 200 millions de dollars pour une protection côtière à Alexandrie et met particulièrement l'accent sur les zones urbaines côtières et l'agriculture.

### 5.2 État atollien : République des Kiribati

Le GIEC met aussi en évidence les États atolliens. Les atolls sont des îles basses et fragiles, constituées de débris issus de l'écosystème corallien (coraux, coquillages...). Seules quelques espèces végétales, contribuant à stabiliser ces masses sédimentaires, se maintiennent sur des sols pauvres et alcalins, et l'eau douce est présente uniquement sous la forme nappes souterraines.

En république des Kiribati, petit état archipelagique dans l'océan Pacifique classé selon les critères des Nations Unies dans la liste des pays les moins avancés, la réduction de surface des îles coralliennes et la multiplication des épisodes de submersion marine sont les deux principaux impacts associés à l'élévation du niveau moyen de la mer.

Concernant l'érosion côtière, le GIEC a récemment nuancé ses propos depuis que les dernières études ont montré une stabilisation ou une légère augmentation de la superficie, malgré l'élévation du niveau de la mer. Cela serait lié à la destruction de la mangrove, mais aussi à la construction d'infrastructures sur l'atoll constituant des obstacles à la dérive des sédiments côtiers, et modifiant leur dynamique naturelle. Cela entraîne un engrangement à l'amont de la structure et un amaigrissement à l'aval.

Les épisodes de submersion marine, résultant de la conjugaison des marées, des vents ainsi que de la pression atmosphérique pourraient, quant à eux, être intensifiés par l'élévation de la mer, atteignant un niveau extrême. Cela provoquerait principalement la mort de la végétation et la diminution de la fertilité des sols, la perte de terre en cas d'action aggressive des vagues, les dommages sur l'habitat, mais aussi la salinisation des sols et des réserves d'eau douce.

Le pays est aussi soumis à des houles cycloniques, et au phénomène El Niño, impactant fortement le niveau de la mer. Sur l'atoll Tarawa, les marées d'équinoxe combinées à cet épisode météorologique ont généré 6 des 10 plus hauts niveaux marins jamais enregistrés.

Afin de protéger les côtes, le gouvernement de Kiribati s'est fortement investi dans la restauration des mangroves. Elles sont sources de biodiversité et permettent de dépolluer l'eau des lagons. Une autre alternative pour la protection des Kiribati est la préservation des récifs coralliens. Ayant la capacité de suivre l'élévation du niveau de la mer par croissance verticale, ils peuvent servir de brise-lames atténuant l'énergie des vagues.

## 6 Conclusion

Ainsi, bien que le niveau de la mer n'a jamais été constant, on constate une hausse importante de la *SSH*. Grâce à l'altimétrie satellitaire, nous comprenons de manière plus globale, comment évolue cette élévation.

La *SLA* nous donne une première estimation de la variabilité du niveau de la mer, et l'*ADT* est l'une des mesures qui permet, comme nous l'avons vu, de comprendre que cette élévation n'est pas uniforme en raison de la variabilité naturelle, mais aussi de la perturbation du système climatique lié aux activités anthropiques, qu'il ne faut pas négliger.

En effet, il a été estimé qu'en 2100, entre 0,2 et 4,6% de la population mondiale sera annuellement inondée à cause de la montée des eaux.

Dans les études de cas, nous avons vu que les zones deltaïques sont vulnérables en raison de la géologie de leur sol. Les risques peuvent aussi être aggravés par des barrages retenant les sédiments, et des activités humaines comme l'extraction de ressources qui perturbent la formation naturelle des deltas.

Les Etats atolliens situés à seulement quelques mètres au dessus du niveau de la mer sont aussi très exposés. La vulnérabilité des communautés côtières dépend des infrastructures mises en place mais aussi des solutions développées, comme la préservation des coraux et des mangroves, protégeant les îles de l'érosion et des submersions.

Ainsi, une solution efficace serait de limiter les activités anthropiques dévastatrices et de mettre en œuvre des installations permettant de réduire l'exposition aux menaces.

On le comprend, tous les pays ne font pas face aux mêmes difficultés, et ne seront pas impactés de la même manière. À cela, s'ajoute un facteur économique. En effet, les pays riches auront plus de moyens pour se protéger.

## 7 Remerciements

Je souhaite vivement remercier mon tuteur, Monsieur Yann Ourmières, pour son temps et ses conseils qui m'ont fortement aidée dans l'élaboration de ce projet, et ont contribué à alimenter ma réflexion. Il m'a aussi confortée dans l'intérêt que je porte pour ce domaine d'étude.

Tout au long de ces 2 années, son entrain et sa bonne humeur m'ont accompagnée, merci à lui.

Merci également à Madame Sabine Arnault, avec qui j'ai eu l'occasion d'échanger l'an dernier alors que je commençais tout juste mon année de L1 et qui a pris de son temps pour me raconter son métier d'océanographe dynamicienne.

## 8 Bibliographie

### Références

- [1] IPCC, *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, Chapter 4 : Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*
- [2] Capucine Licoys, *Montée des eaux : quelles sont les îles les plus directement menacées de disparaître ?*, LaCroix, 2023
- [3] Wikipédia, *Politiques d'adaptation face à la montée des eaux dans les États insulaires formés d'atolls*, 2023
- [4] Thibault Lorin, Ayman El-Shafey *Impact des activités humaines sur l'érosion littorale*, Planet Terre, 2018
- [5] Futura-Sciences, *La terre s'enfonce sous nos pieds un peu partout dans le monde : voici pourquoi*
- [6] Esméralda Longépée, *Les atolls, des territoires menacés par le changement climatique global ? L'exemple de Kiribati (Pacifique Sud)*, Géoconfluences, 2015
- [7] Christina Nunez, *Élévation du niveau de la mer : les chiffres clefs*, National Geographic
- [8] Tifenn Clinkemaillié, *Inondations, ouragans... : le réchauffement climatique amplifie les phénomènes météorologiques extrêmes*, LesEchos, 2024
- [9] AVISO, *Comment fonctionne l'altimétrie*
- [10] Thierno A. Diallo, *Étude de la distribution régionale du niveau de la mer*, Mémoire de Master, 2023
- [11] Planet Terre, *Océanographie Physique*
- [12] Fatma Jebri, *Apport de l'altimétrie satellitaire pour l'étude de la variabilité de la circulation de surface dans le canal de Sicile et sur le plateau continental Tunisien*, Thèse Hal Science, 2017
- [13] ScienceClic, *L'effet Coriolis*, 2020
- [14] Florian Le Guillou, *Cartographie dynamique de la topographie de l'océan de surface par assimilation de données altimétriques*, Thèse Hal Science, 2022
- [15] Noémie Schifano, Alberto Naveira-Garabato, Alessandro Silvano, Farid Benboudjema, *Formation des eaux profondes en Antarctique, Part II : Méthode et Outils*, Thèse, 2021.
- [16] NOAA, *Effects of Climate Change*
- [17] NOAA, *What are El Niño and La Niña ?*
- [18] NOAA, *Thermohaline Circulation*
- [19] Sylvain Pichat, Pierre Thomas, Jean-François Minster, *Les courants thermohalins et les eaux océaniques profondes*, Planet Terre, 2001
- [20] ODATIS, *Hauteurs de mer*