

Changement climatique et acidification des océans

Quelles conséquences sur la biodiversité marine



Jean-Luc Beaud
mémoire FB1 - 2016
www.jlbphotobiosousmarine.fr

Introduction

Les Français les nomment au pluriel, les Anglo-Saxons au singulier. En réalité, ils sont cinq et un seul à la fois car tous communiquent.

Les cinq océans - Atlantique, Pacifique, Indien, Arctique et Austral constituent ce qu'on appelle l'océan global - c'est le terme que nous utiliserons dans ce mémoire quand nous évoquerons l'océan.

Les océans recouvrent 71 % de la surface de la terre. Selon l'ONU, plus de 2,6 milliards d'êtres humains dépendent principalement des océans pour leurs besoins en protéines, et plus de 2,8 milliards de personnes vivent à moins de cent kilomètres de leurs côtes. Les océans fournissent l'eau de pluie et une grande partie de l'oxygène nécessaires à la vie. Ils jouent un rôle écologique essentiel. Par la circulation des courants marins et le brassage permanent des eaux profondes comme par leur capacité d'absorption du dioxyde de carbone (CO₂), ils contribuent à la régulation du climat de la planète. (1)

La majeure partie des scientifiques s'accorde aujourd'hui pour reconnaître qu'un changement climatique global est en cours et en imputer l'origine principalement aux activités anthropiques, particulièrement celles qui génèrent des émissions de gaz à effet de serre, parmi lesquels le dioxyde de carbone joue un rôle central.

Effet pervers de l'ère industrielle, l'augmentation de ce dioxyde de carbone rejeté dans l'atmosphère influence à la fois le changement climatique et la chimie des océans.

En effet, un tiers des rejets de CO₂ émis par l'Homme depuis le début de l'ère industrielle a été absorbé par l'océan. De ce fait l'eau de mer devient plus acide à une vitesse et dans des proportions alarmantes, ce qui a des effets sur la biodiversité marine.

Nous rappellerons tout d'abord dans ce mémoire, brièvement, ce qu'est l'effet de serre, son impact sur le climat et par voie de conséquence ses effets sur l'océan. (2)

Puis nous développerons notre étude sur l'acidification des océans et ses conséquences sur les conditions de vie des organismes marins. (3)

(1) *Quels moyens et quelle gouvernance pour une gestion durable des océans ? Catherine Chabaud Juillet 2013*

(2) *Ocean-climate.org*

(3) *Océans, T. Fogeron et E. Vignon*

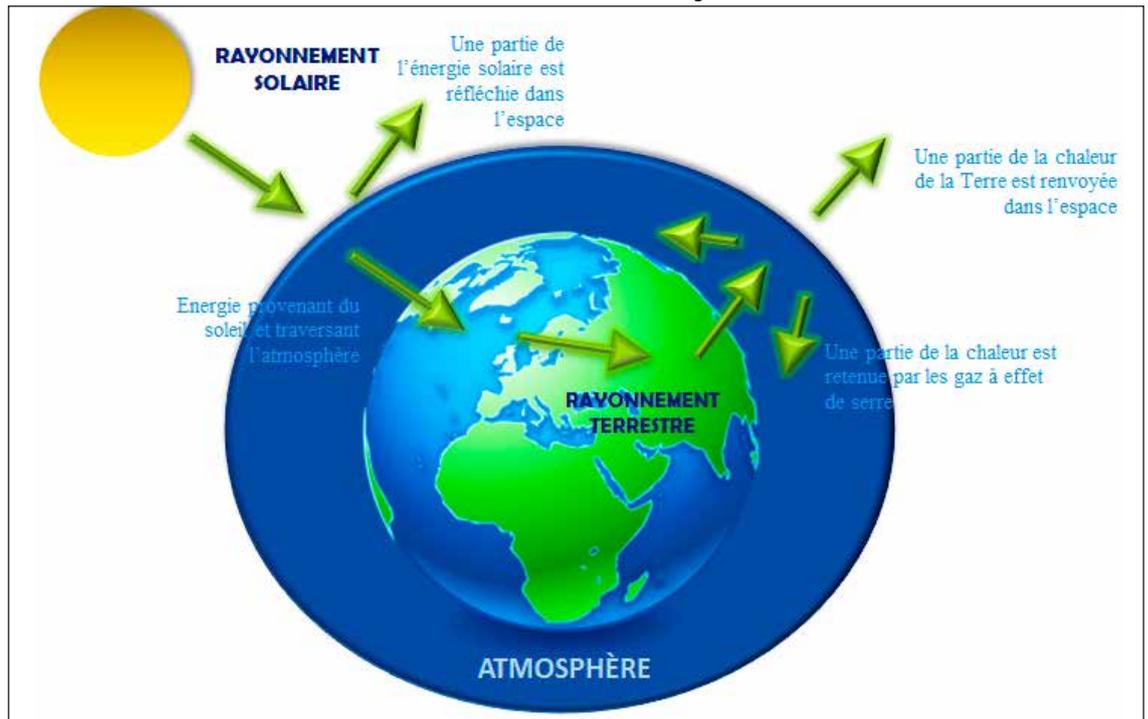
Sommaire

- Effet de serre et augmentation du CO₂.....page 7
- Les effets du changement climatique sur l'océan.....page 11
- Modification du pH de l'océan :
 - pH, vous avez dit pH ?.....page 21
 - vers l'acidification.....page 23
- Conséquence de la modification du pH de l'océan sur la biodiversité marine.....page 29

L'effet de serre

Les scientifiques et les médias l'accusent de tous les maux. Quel est ce phénomène qui serait la principale cause du réchauffement climatique et de l'océan global ? L'effet de serre nécessite quelques explications.

L'effet de serre : comment ça marche ?



Source : <http://www.lutte-effetdeserre.sitew.com>

L'effet de serre : qu'est-ce que c'est ?

Une partie de l'énergie solaire qui parvient au sol réchauffe la surface de la Terre et se transforme en rayons infrarouges (chaleur) qui repartent dans l'atmosphère. Comme les vitres d'une serre - d'où le nom donné à ce mécanisme - des gaz présents dans l'atmosphère empêchent une partie de ces rayons infrarouges de repartir vers l'espace, ce qui tend à réchauffer l'atmosphère et la surface de la Terre. (1)

Il faut distinguer l'**effet de serre naturel** (voir schéma 1), qui est indispensable à la vie sur Terre, de l'**effet de serre renforcé par l'activité humaine** (voir schéma 2).

En absence d'effet de serre naturel, la température moyenne sur la Terre serait seulement de -18°C. Grâce à lui, la moyenne est de 15°C.

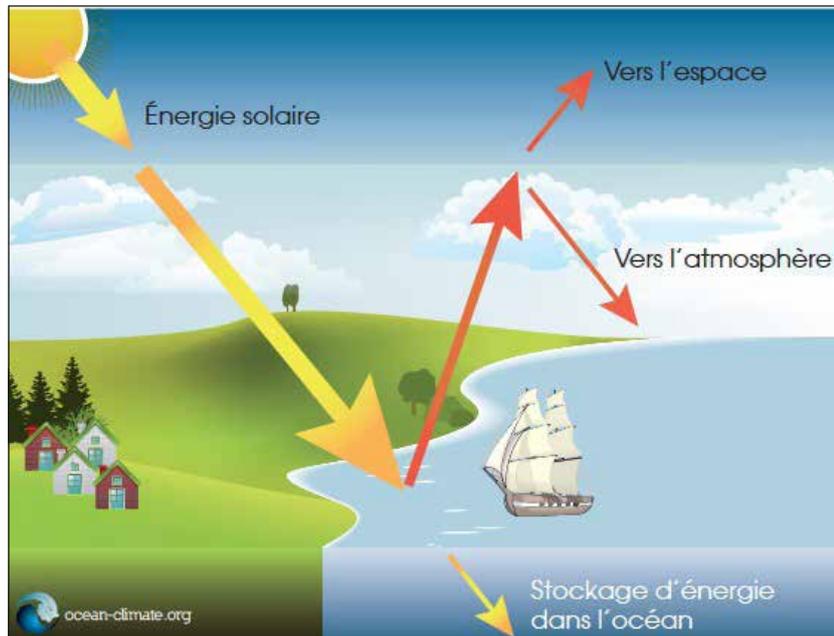
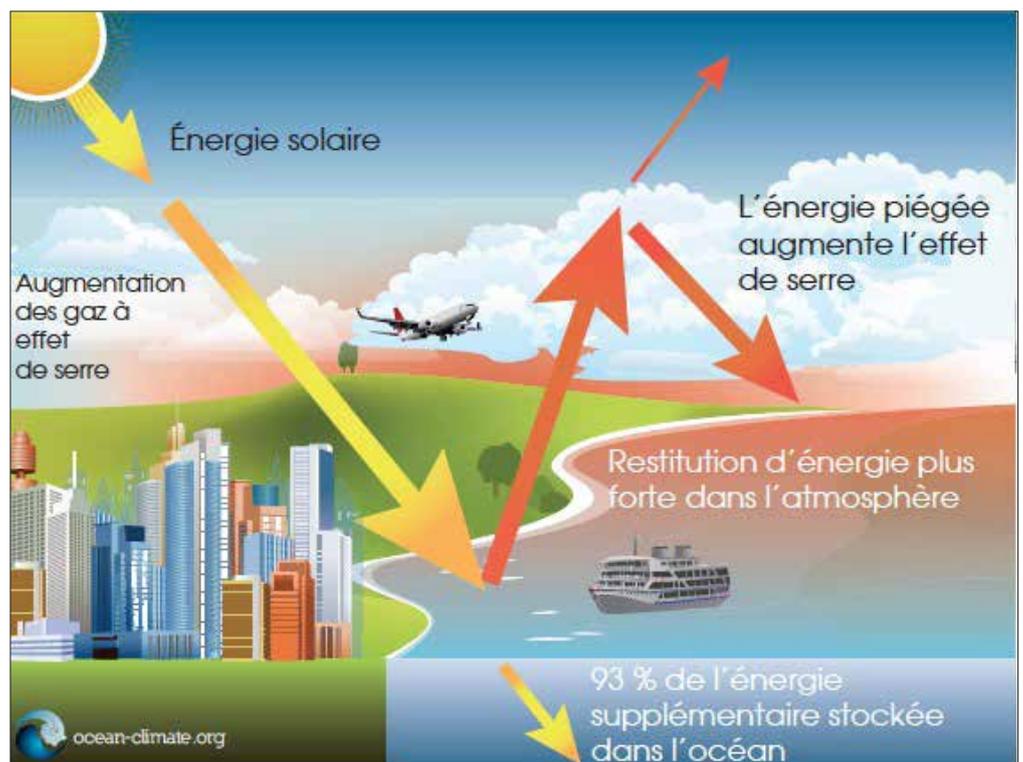


Schéma 1
Effet de serre naturel

L'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis le début de l'ère industrielle est responsable du réchauffement planétaire que l'on observe actuellement (schéma 2).

Au cours des 15 dernières années, le CO₂ a été le principal gaz à contribuer à l'effet de serre, les autres étant le méthane, l'oxyde nitreux et les hydrocarbures halogénés.

Schéma 2 - Effet de serre renforcé par l'activité humaine



Le surplus de chaleur généré par les activités humaines, via l'effet de serre, est absorbé à 93 % par l'océan, ce qui atténue l'augmentation de la température dans l'atmosphère.

Cette absorption de chaleur induit un léger réchauffement de l'océan. Celui-ci est sensible au moins jusqu'à 700 mètres de profondeur (voir en détail page 13). Ce réchauffement atteint désormais les grands fonds dans les régions polaires et se propage vers tous les bassins océaniques. Etant donné le volume de l'océan, cela représente une gigantesque quantité de chaleur! Et même si les émissions de gaz à effet de serre s'interrompaient aujourd'hui, les effets liés à cette augmentation de température de l'océan se poursuivraient pendant des décennies.

L'océan global joue donc un rôle de régulation et de contrôle des grands équilibres naturels planétaires. Il modère les variations du climat. D'ailleurs, celles-ci seraient beaucoup plus rapides, plus intenses aussi, si elles n'étaient déterminées que par l'atmosphère.

L'augmentation de chaleur liée aux activités humaines affecte l'ensemble de la mécanique thermique planétaire, océan compris, l'océan et l'atmosphère interagissant l'un sur l'autre de façon permanente.



(1) Cea

(2) GIEC Glossary , traduit par GreenFacts

Schéma : <http://www.lutte-effetdeserre.sitew.com>

Les effets du changement climatique sur l'océan

Le Giec (1) donne à propos du **changement climatique la définition** suivante : "*Variation de l'état du climat, qu'on peut déceler par des modifications de la moyenne et/ou de la variabilité de ses propriétés et qui persiste pendant une longue période, généralement pendant des décennies ou plus. Les changements climatiques peuvent être dus à des processus internes naturels ou à des forçages externes, notamment les modulations des cycles solaires, les éruptions volcaniques ou des changements anthropiques persistants dans la composition de l'atmosphère ou dans l'utilisation des terres.*"

L'article premier de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), les définit comme des «*changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables*».

La CCNUCC établit ainsi une distinction entre les changements climatiques attribuables aux activités humaines altérant la composition de l'atmosphère et la variabilité du climat imputable à des causes naturelles.

Etat des lieux

Le réchauffement climatique est sans équivoque.

Les changements observés depuis les années 50 sont sans précédent depuis des décennies voire des millénaires. L'atmosphère et l'océan se sont réchauffés, la couverture de neige et de glace a diminué sur l'ensemble de la planète, le niveau des mers s'est élevé. Ces faits sont liés à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce phénomène est surtout totalement inédit par sa rapidité.

Le réchauffement océanique :

Entre 1870 et 1971

Il est probable que l'océan superficiel (jusqu'à 700 m de profondeur) s'est réchauffé.

Entre 1971 et 2010

Il est quasiment certain que l'océan superficiel s'est réchauffé. Pendant cette période, relativement bien documentée, l'océan superficiel a emmagasiné plus de 60 % de l'augmentation nette d'énergie absorbée par le système climatique, dont environ 30 % en dessous de 700 m.

À l'échelle mondiale, le réchauffement de l'océan est donc plus prononcé près de la surface : les 75 premiers mètres se sont réchauffés de 0,11 °C par décennie sur cette période.

Entre 1992 et 2005

On dispose de suffisamment d'observations sur cette période pour estimer qu'il y a eu une augmentation de température en dessous de 2 000 m. Si l'on n'observe pas de tendance significative entre 2 000 et 3 000 m, en revanche, il est probable que l'océan profond, en dessous de 3 000 m, s'est réchauffé également, l'augmentation la plus importante étant observée dans l'océan austral.

Amplification des écarts de salinité

Il est très probable que les régions à salinité élevée (où l'évaporation domine le bilan d'eau en surface) sont devenues plus salées, tandis que les régions à faible salinité (où

les précipitations dominant) sont devenues moins salées depuis les années 1950. Ces tendances régionales de la salinité océanique suggèrent des changements d'évaporation et de précipitations sur les océans.

Pas de perturbation de la circulation océanique

Une des composantes essentielles du climat terrestre est la **circulation méridienne moyenne** (MOC en anglais Meridional overture circulation). La MOC contribue à transporter les eaux chaudes de surface de l'océan Atlantique des tropiques vers le pôle Nord, sous l'effet notamment du contraste de température des eaux de surface de cet océan (l'eau de surface étant plus chaude à l'équateur qu'aux pôles). Là, elles se mélangent avec les eaux froides environnantes, lesquelles circulent, en profondeur, de l'Atlantique Nord vers l'équateur et les autres bassins océaniques.

La circulation océanique



© Planet Observer/INSU

Explication du schéma de la circulation océanique.

En hiver, dans les régions polaires, le refroidissement et la formation de la banquise (l'eau douce gèle entraînant une augmentation de la salinité dans la masse d'eau restante), augmentent la densité de l'eau, qui tend alors à descendre vers le fond. C'est l'origine du courant froid profond qui circule tout autour de la planète. En surface, les eaux suivent le mouvement inverse, transportant d'énormes quantités de chaleur. Les petites flèches entre l'Europe et le Groenland, au niveau de la mer de Norvège, montrent l'étalement en surface des eaux chaudes du Gulf Stream, en été.

Les fluctuations de la MOC nous intéressent car elles pourraient avoir provoqué dans le passé des alternances climatiques : la MOC était forte (un état dit "on") durant les périodes tempérées, et faible (un état dit "off") durant les périodes glaciaires, en particulier pendant les 30 000 dernières années. Ces fluctuations sont liées aux variations de salinité des eaux de surface de l'Atlantique Nord : un surplus d'eau douce allège les masses d'eau en surface et stabilise la stratification des eaux, ce qui diminue la formation d'eau dense et ralentit la MOC (et inversement). Ce ralentissement est-il progressif? Cela dépend si la MOC se trouve dans le régime mono-stable "on" ou dans le régime dit bi-stable, dans lequel les deux états de la MOC coexistent statistiquement.

En effet, lorsque la MOC est dans le régime bi-stable, elle transporte, au niveau où l'Atlantique rejoint l'océan Austral, de l'eau plus salée que la moyenne mondiale vers le nord et de l'eau moins salée que la moyenne mondiale vers le sud, le bilan net étant

donc un transport d'eau douce vers le sud. Si un ralentissement de la MOC survient, ces deux transports diminuent, contribuant à augmenter la quantité d'eau douce dans l'Atlantique Nord et donc à accentuer le ralentissement de la MOC. On parle de boucle de rétroaction positive, une condition qui rend possible un changement brutal de la MOC. À l'inverse, si la MOC est dans un régime mono-stable, le transport net d'eau douce dans l'Atlantique Sud est orienté vers le nord et la boucle de rétroaction est négative ce qui a tendance à stabiliser la MOC. (2)

Il n'existe pas d'élément observationnel montrant une tendance de retournement de la circulation méridienne océanique de l'Atlantique (AMOC : Atlantic Meridional overturning circulation) sur la base de 10 ans d'observations de l'AMOC, ni sur la base de séries d'observations plus longues des composantes individuelles de l'AMOC.

Le niveau des mers

Depuis le milieu du XIX^e siècle, le rythme d'élévation du niveau moyen des mers est supérieur au rythme moyen des deux derniers millénaires. Ainsi entre 1901 et 2010, le niveau moyen des mers à l'échelle du globe s'est élevé de 0,19 m.

Le modèle climatique utilisé par le GIEC pour les rapports de 2013 et 2014 prédit une montée du niveau de la mer d'environ 90 cm d'ici 2100, ce qui, avec l'augmentation des vagues et des tempêtes causerait des dégâts considérables, impactant les villes et stérilisant les champs par des infiltrations d'eau salée. Ces dernières années, ce chiffre a été revu à la hausse à chaque nouveau rapport car la fonte des glaces dépasse les prévisions. Elle atteint un degré inquiétant. Les glaciers de l'Arctique et de l'Antarctique semblent fragilisés. (3)

D'après James Hansen (département des Sciences de la Terre et de l'environnement de l'Université Columbia), le modèle utilisé par le GIEC en 2013 ne semble pas bien décrire la réalité de la circulation océanique. Lorsque la glace fond, une stratification importante de la colonne d'eau se produit, l'eau douce froide reste en surface et des courants de plus en plus chauds circulent à quelques centaines de mètres de profondeur. Ces courants sapent les bases des glaciers, comme plusieurs observations de l'Antarctique-Ouest et du plus grand glacier antarctique, le Totten, l'ont montré récemment.

Les modèles actuels n'appréhendent peut-être pas correctement les mécanismes menant à la montée du niveau de la mer. L'inquiétude des scientifiques est qu'en atteignant la température du MIS5 (dernière période interglaciaire, il y a environ 120 000 ans), nous déclenchions le même phénomène de forte montée de niveau de la mer (4).

La fonte massive des glaces, d'après James Hansen et Valérie Masson-Delmotte (coprésidente du GIEC 2015), pourrait par contre limiter le réchauffement à 3° environ. Cet effet tampon, dû à l'eau froide qui s'étalerait à la surface des océans, pourrait durer des centaines d'années, mais à l'arrêt de la fonte des glaces, la température remonterait brusquement.

L'augmentation de la concentration de CO2 dans l'atmosphère impacte l'océan

Les concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, de méthane et de protoxyde d'azote ont augmenté pour atteindre des niveaux sans précédent depuis au moins 800 000 ans. La concentration du dioxyde de carbone a augmenté de 40 % depuis l'époque préindustrielle. Cette augmentation s'explique en premier lieu par l'utilisation de combustibles fossiles et en second lieu par le bilan des émissions dues aux changements d'utilisation des sols. L'océan a absorbé environ 30 % des émissions anthropiques

de dioxyde de carbone, ce qui a entraîné une acidification de ses eaux. (Voir chapitre sur *Modification du pH de l'océan : vers l'acidification* - page 21).

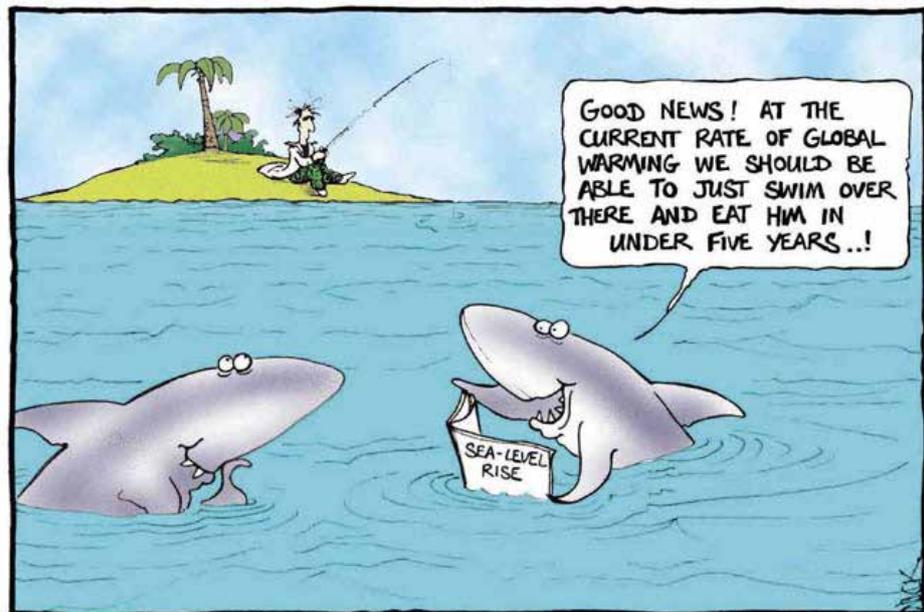
En conclusion

L'influence de l'activité humaine sur le système climatique est clairement établie, sur la base des données concernant l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, qui provoque le réchauffement observé du système climatique.

Les conséquences de ces phénomènes climatiques sur l'océan :

- les eaux se réchauffent,
- le niveau des eaux augmente,
- les écarts de salinité pourraient simplifier
- la concentration du dioxyde de carbone entraîne une acidification de l'océan

Mais on ne constate pas de retournement de l'AMOC.



Bonne nouvelle ! A la vitesse actuelle du réchauffement climatique, on devrait pouvoir nager simplement par-dessus et le manger d'en moins de 5 ans.

Titre du journal : *Montée des eaux*

(1) GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) *Changements climatiques 2014 - Résumé à l'intention des décideurs*

(2) www.insu.cnrs.fr/node/4535

www.cnrs.fr/cw/dossiers/dospoles/alternative14.html

(3) <http://adrastia.org/les-grands-dangers-du-rechauffement-dorota-retelska-dr-es-sciences/>

(4) Hansen et al, 2015

Modification du pH de l'océan : pH, vous avez dit pH ?

Pour la petite histoire, ce terme **pH**, abréviation de **potentiel hydrogène**, a été utilisé/ publié pour la toute première fois en 1909 par le chimiste danois Søren Peder Lauritz Sørensen, alors qu'il était en train de travailler sur des ions hydrogène...

Le pH est la grandeur physique qui permet d'évaluer l'acidité d'un liquide : il indique donc si un milieu est basique ou acide.

Pour l'eau douce, le pH neutre est entre 6 et 7 ; il est plus élevé dans le milieu marin. Le bon équilibre du pH de la mer est en moyenne 8 et peut aller jusqu'à 8,3.

Quand le chiffre augmente, c'est que le milieu devient basique (alcalin); s'il diminue, c'est que l'eau est plus acide.

Le terme "*acidification des océans*" peut être trompeur. Les océans ne deviendront pas acides (c'est à dire que leur pH ne deviendra pas inférieur à 7), du moins pas dans un avenir prévisible. Le terme "*acidification*" signifie juste que le pH des océans diminue. (1)

Une différence de 0.1 unité peut paraître faible, mais l'échelle de pH étant logarithmique, une diminution de 0.1 unité représente une augmentation en concentration d'ions hydrogènes (H⁺) de 30 %.



- Energies fossiles, réchauffement climatique, montée du niveau de la mer, et maintenant quoi ?
- Le niveau d'acidité...

(1) www.epoca-project.eu/index.php/home/summaries-in-different-languages/in-danish.html

Modification du pH de l'océan : vers l'acidification

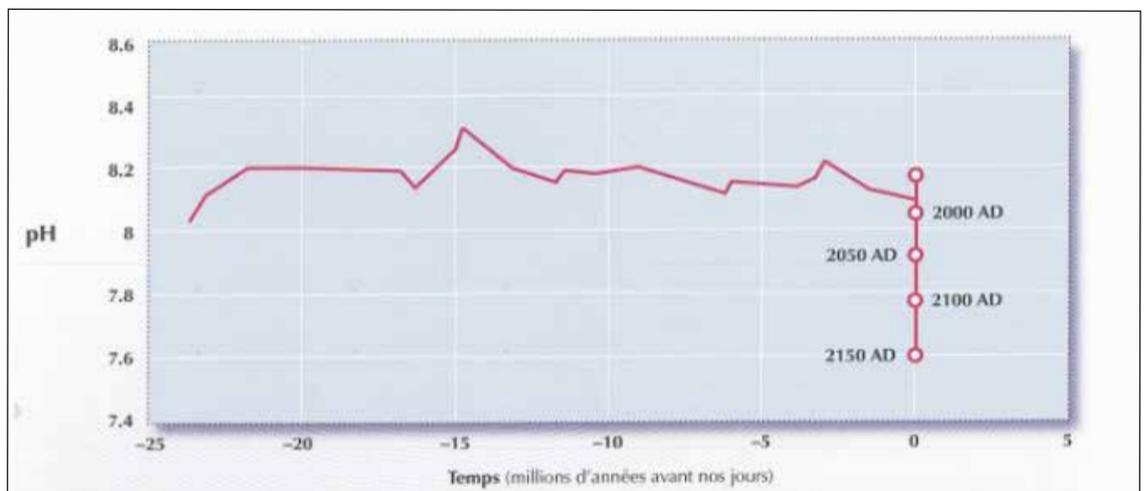
L'océan a un pH stable ou qui a très peu changé depuis au moins 60 millions d'années. Pourtant, depuis une trentaine d'années, et ceci **directement et totalement lié aux émissions de CO₂ atmosphérique**, le pH est en train de diminuer : de 8,18 depuis très longtemps, il a baissé, notamment depuis la révolution industrielle, et atteint 8,08 selon T. Fogeron et E. Vignon. Il pourrait encore baisser de 0,3 à 0,4 unités d'ici la fin du XXI^e siècle. Si a priori ce chiffre semble faible, il ne faut pas oublier que le pH est une grandeur logarithmique de la concentration en ion H⁺. Une telle diminution du pH correspond à une acidité multipliée par 2, ce qui a des conséquences importantes pour la chimie des océans.

Certains spécialistes prédisent même un pH à 7,6 en 2100.

Les deux schémas ci-dessous illustrent l'ampleur de ces variations.

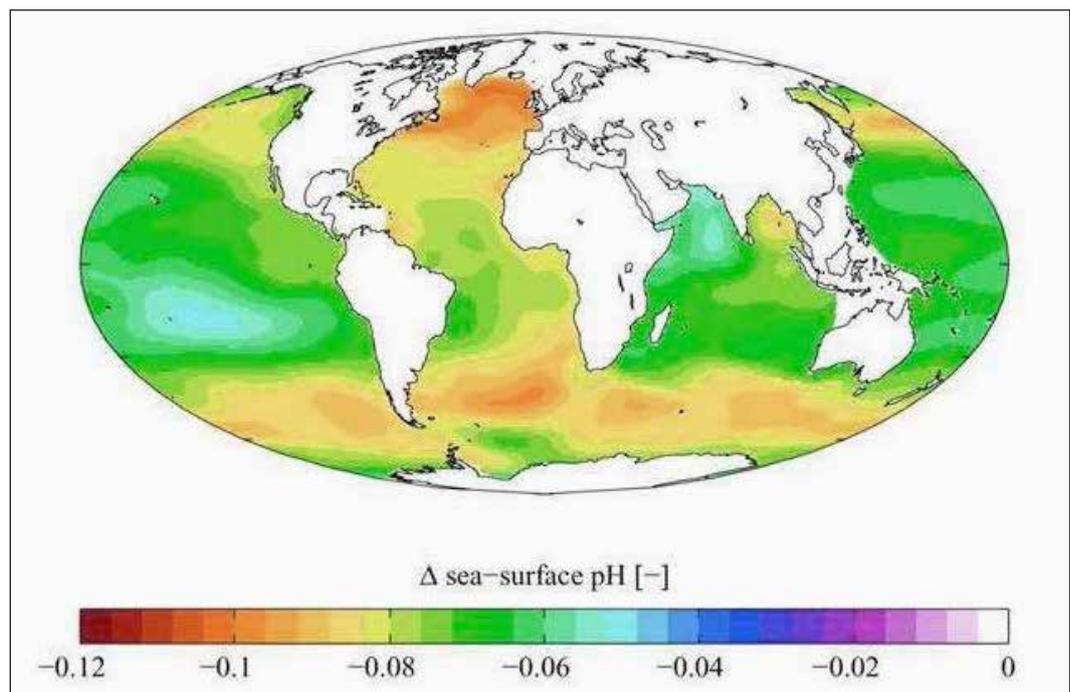
Variation du pH océanique au cours des 25 derniers millions d'années

D'après Turley et al., in Avoiding Dangerous Climate Change 2006

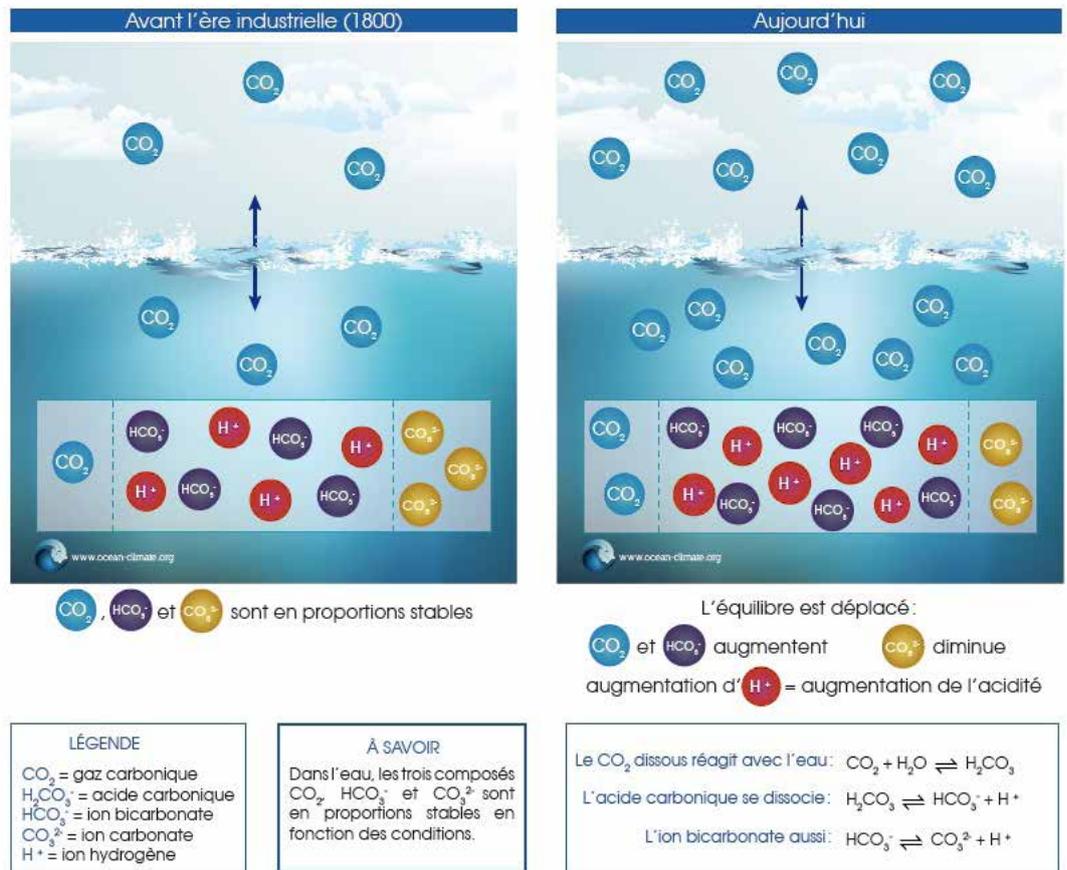


Baisse du pH entre 1960 et aujourd'hui

source : T. Fogeron et E. Vignon



En savoir plus sur le mécanisme chimique de l'acidification des océans



Explications des tableaux ci-dessus. L'augmentation du CO_2 --> une augmentation de H^+ --> diminution du pH de l'océan (augmentation de l'acidité).

Actuellement, l'eau de mer a un pH compris entre 8,1 et 8,3, ce qui fait que le H_2CO_3 ne va pas s'accumuler, mais va majoritairement se transformer en sa base conjuguée HCO_3^- par la réaction $\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{H}^+$. L'acidité de la mer va ainsi augmenter.

Si, en moyenne, 30 % du CO_2 émis dans l'atmosphère est absorbé par les océans, ce processus ne se fait pas cependant de manière homogène dans les différents bassins du monde. En effet, **cette réaction de dissolution est favorisée à basse température. Les océans froids absorbent donc beaucoup plus de CO_2 que les océans chauds.**

Cette propriété peut avoir une autre conséquence : l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère va engendrer une augmentation de température à la surface de la Terre et donc des océans. Ainsi ces derniers pourront moins absorber de CO_2 et celui-ci s'accumulera de manière plus importante dans l'atmosphère et donc accentuera le réchauffement de la planète. (1)

Quand l'eau s'acidifie, elle devient corrosive et agit sur le calcaire des organismes marins un peu comme le vinaigre décape celui du lavabo...

De nombreux végétaux ou animaux à squelette externe (plancton, gastéropodes, larves d'huîtres, de moules, crustacés, coraux...) risquent ainsi de disparaître ou de se transformer.

Pour résumer, les 3 causes principales de l'acidification de l'océan sont :

1 - l'absorption par l'océan de dioxyde de carbone atmosphérique d'origine anthropique. C'est la principale cause identifiée, et certainement la plus importante ;

2 - l'absorption par l'océan de pluies ou d'eaux météoritiques ou de ruissellement acidifiées par divers composés azotés anthropiques. Ces composés sont issus de la circulation motorisée, de l'agriculture et du chauffage qui dégagent des oxydes d'azote, source d'acide nitreux et d'acide nitrique lesquels contaminent l'atmosphère puis les mers via les pluies et les cours d'eau;

3 - l'absorption de composés soufrés issus des combustibles fossiles (pétrole, charbon, gaz). Le soufre, lors de la combustion, se transforme en dioxyde de soufre, source d'acide sulfureux et d'acide sulfurique. La plupart des navires de marine marchande et de marine de guerre utilisent encore des combustibles lourds très polluants et notamment sources d'aérosols soufrés. Ils sont une source importante d'aérosols atmosphériques.

(1) *T. Fogeron et E. Vignon*

Conséquence de l'acidification et du réchauffement océanique

Les conséquences de l'acidification sur la biodiversité marine

L'augmentation de la concentration de CO₂ océanique, et donc l'acidification des océans, entraîne une diminution de la profondeur de la zone de saturation du calcaire. Une importante partie de la biomasse marine est constituée d'organismes synthétiseurs de calcaire. Or l'acidification des océans a un grand impact sur ces organismes. Afin de mieux comprendre les conséquences de la baisse du pH sur ces espèces, il faut analyser les influences d'une baisse de pH sur le **calcite** (calcaire des coraux et des coccolithophoridés) et l'**aragonite** (calcaire des ptéropodes).

Ces deux calcaires présentent des structures cristallines distinctes, ce qui induit des différences de propriétés physiques et donc de réaction à l'acidification.

A une certaine profondeur appelée **lysocline** (vers 4 000 mètres), le calcaire commence à se dissoudre.

Au-dessous d'une profondeur appelée ACD (aragonite compensation depth) pour l'aragonite ou CCD (calcite compensation depth) pour la calcite, tout le calcaire est dissous (vers 4 500 mètres de profondeur). L'ACD est moins profonde que la CCD, car l'aragonite est métastable, donc plus facilement soluble.

De ce fait, en dessous de 4 500 mètres de profondeur, aucun organisme calcaire ne peut survivre.

Même s'il est aujourd'hui encore très difficile de quantifier cette remontée de la lysocline, les biologistes commencent à s'inquiéter pour la survie des espèces "calcaires" benthiques et pélagiques. Un changement conséquent de la biomasse marine est donc envisageable si l'on ne diminue pas les rejets de dioxyde de carbone.

Les créatures les plus vulnérables à cette réduction rapide du pH de l'océan sont donc celles constituées d'une structure calcaire ou d'une coquille. Une petite différence de quelques dixièmes est considérable pour les espèces planctoniques, en particulier pour les coquillages à leur stade larvaire, car leur coquille calcaire de quelques microns est très sensible à l'acidité.

Par exemple, avec un pH de 7,7, leur coquille peut être totalement rongée et disparaître. Tout comme la carapace, encore plus fragile, des larves de crustacés, qui, à ce pH, seraient probablement décimées.

Or, ce fameux zooplancton permanent est un maillon essentiel de la chaîne alimentaire marine (*voir schéma sur La chaîne alimentaire marine page 37*). Il ne peut y avoir de poisson s'il n'y a pas de copépodes (crustacés éléments du zooplancton) à leur disposition. Pour exemple, ils constituent la nourriture quasi-exclusive des morues.

Quelques exemples d'espèces menacées :

- > certains éléments du phytoplancton (les coccolithophoridés) et du zooplancton
- > mollusques (exemple des ptéropodes)
- > coraux

Les coccolithophoridés sont des algues planctoniques unicellulaires qui protègent leur cellule sous une coccosphère constituée de plaques de calcite appelées coccolithes. Leur

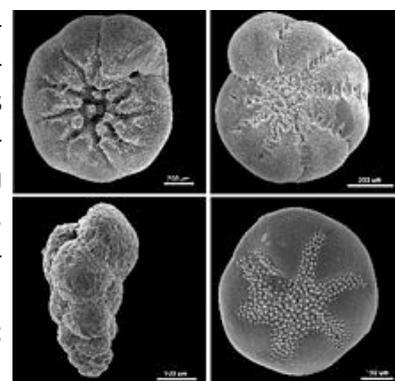
taille est comprise entre 5 et 50 microns. On a estimé qu'un litre d'eau de mer contient 5 milliards de coccolithes. Lorsque l'algue meurt, les coccolithes tombent et leur accumulation donne naissance à des boues qui se sédimentent au fil des millions d'années... Les falaises de craie que l'on peut voir sur les côtes de la Manche ont été formées par ces coccolithes. Ce phytoplancton recouvert de petites plaques de carbonates de calcium est à la base de la chaîne alimentaire : si ce type de plancton est touché par la diminution du pH, c'est toute la biodiversité marine qui pourrait donc en subir les conséquences. (2)



Emiliaia
(coccolithophoracées)

Les foraminifères (organismes planctoniques) et les ptéropodes (mollusques planctoniques) sont parmi les plus fragiles, selon le rapport de la 12^e Conférence des Parties en 2006 (Conférence of Parties COP), et «*verront probablement une calcification réduite, voire une dissolution dans les conditions projetées pour le futur*» (6).

Les foraminifères : ce sont des protozoaires unicellulaires apparus au Cambrien inférieur. Leur coquille minérale est appelée «test». Elle comprend une ou plusieurs chambres reliées entre elles, et est munie d'un ou plusieurs orifices (*foramen*) qui relient ces loges au milieu extérieur. De ces *foramens* sortent des pseudopodes, qui permettent à l'animal d'interagir avec son environnement : préhension, alimentation, déplacement. Leur taille est généralement comprise entre 0,1 et 1mm ; certains peuvent atteindre 10 cm ou plus. Ce sont donc pour certains des unicellulaires géants.



Foraminifères marins (Photo microscope électronique)

On distingue des foraminifères benthiques et des foraminifères planctoniques. On recense actuellement plus de 6 000 espèces vivantes connues, ce qui est sans doute peu comparé à la diversité effective. Les foraminifères, en particulier benthiques, sont de bons bio-indicateurs de l'environnement.

Les foraminifères sont ingérés par d'autres organismes (vers, gastéropodes, crustacés, échinodermes, poissons, ...). S'ils disparaissaient, quel impact cela aurait-il sur l'alimentation de ces organismes ? Aucune étude n'est, à ce jour disponible sur ce risque, mais cela bouleverserait probablement la chaîne alimentaire marine.

Les ptéropodes : ces petits mollusques vivent essentiellement en Arctique, un des océans les plus touchés par la disparition de l'aragonite. Or la coquille de ces mollusques, essentielle à leur survie, est composée d'aragonite : ils devraient donc migrer dans des océans plus chauds où ils seront amenés à disparaître car non adaptés à ces milieux. Dans tous les cas, cela engendrera un bouleversement de l'écosystème arctique (qui abrite de nombreuses espèces de poissons, de baleines et d'oiseaux de mer) puisque les ptéropodes sont le maillon de base de la chaîne alimentaire de cette région.



Limacina inflata

D'autres espèces de phytoplancton ou de zooplancton sont également composées de squelettes calcaires, mais celles-ci peuvent être à base calcite. Elles seront alors moins

impactées que les autres car la CCD (calcite compensation depth) est moins touchée par l'acidification que l'ACD (aragonite compensation depth). Mais si le phénomène persiste, ces espèces seront également affectées.

Les coraux, déjà fortement affaiblis par la pollution et la hausse des températures, ne pourraient pas survivre à ce changement de milieu. Ces animaux fabriquent un squelette en carbonate de calcium qui s'accumule et forme des récifs abritant un écosystème très riche : poissons, anguilles, crabes, oursins et plus d'un millier d'autres espèces. La grande barrière de corail constitue la plus grande structure biologique au monde. Parmi les coraux, les espèces les plus touchées sont celles des eaux profondes car plus rapidement exposées à la montée de la lysocline. En plus d'être incapables de reformer de l'aragonite, leur squelette se dissoudra. Plus du trois quart des espèces en eaux profondes seraient ainsi concernées pendant le prochain siècle.

Tout comme le réchauffement des eaux, la diminution de pH peut entraîner le blanchiment des coraux, c'est à dire la perte des algues symbiotiques (les zooxanthelles) vivant à l'intérieur des récifs. Ces derniers seraient donc encore moins protégés contre la corrosion.

Des impacts plus lourds sont à craindre car les coraux abritent des écosystèmes marins uniques et d'autres espèces dépendantes du corail risquent de disparaître.

En outre, les coraux participant à la photosynthèse et à l'absorption du CO₂ terrestre via leurs algues symbiotiques (zooxanthelles) : leur disparition entraînerait inévitablement une augmentation du CO₂ atmosphérique et accélérerait le réchauffement climatique.

(1)

Toutefois, certains organismes devraient profiter de cette modification du pH. En effet, la fraction de H₂CO₃ augmentant lorsque le pH diminue, cela devrait favoriser le développement de certaines espèces, comme des phytoplanctons ou certaines algues (telles les diatomées, microalgues unicellulaires), qui utilisent directement le CO₂ dissous dans l'eau pour leur photosynthèse. Il est en revanche impossible de dire si cette fertilisation sera bénéfique pour la biodiversité marine.

Appauvrissement des océans en sels nutritifs

Le réchauffement climatique aurait un effet important sur la production du **phytoplancton** – algues microscopiques se développant par photosynthèse – dans l'océan austral et, par ricochet, sur la production de l'océan mondial. En réchauffant la surface de l'océan austral, le changement climatique accroît l'écart de densité entre la couche de surface et les eaux profondes. Or, en s'opposant aux brassages des eaux de surface, une stratification accrue de l'océan austral crée des conditions plus favorables à une croissance optimale du phytoplancton antarctique. L'augmentation de la production de phytoplancton dans cette zone contribuerait à appauvrir les eaux antarctiques en sels nutritifs, ce qui perturberait le reste des chaînes alimentaires, l'océan austral alimentant les trois quarts de la production primaire de l'océan mondial en sels nutritifs. (7)

Les conséquences sur les sociétés humaines

La sécurité alimentaire de millions d'humains pourrait être touchée : si l'acidification rend impossible la vie pour les coraux, alors la biodiversité, le tourisme, les pêcheries, l'aquaculture et la protection du trait de côte seront durablement affectés.

Pour l'avenir et à l'horizon de la fin du siècle, les incertitudes sur les conséquences du phénomène sont considérables, d'autant plus qu'il n'existe aucune situation analogue

dans le proche passé.

Des scientifiques se sont penchés sur des observations conduites dans de petites zones de l'océan où des sources naturelles de carbone portent l'acidité des eaux à des niveaux semblables à ceux attendus pour la fin du siècle.

«En Méditerranée, l'étude d'une zone proche du Vésuve soumise à un pH comparable à celui attendu pour 2100 suggère une baisse de 70 % de la biodiversité des organismes calcaires, explique M. Gattuso (Université Pierre et Marie Curie, CNRS). Et une chute de quelque 30 % de la diversité des autres organismes.»

D'autres travaux menés en Papouasie-Nouvelle-Guinée montrent, dans des conditions d'acidité semblables, une forte prolifération des algues non-calcaires et une réduction d'environ 40 % de la biodiversité des coraux. Or les récifs coralliens sont actuellement une source de revenus indirecte pour environ 400 millions de personnes, vivant majoritairement en zone tropicale.

Ces travaux ne permettent toutefois pas de prévoir parfaitement l'avenir. *«En étudiant ces zones, on ne tient pas compte de l'augmentation de la température attendue pour la fin du siècle. Si l'on tient compte du réchauffement en plus de l'acidification, il est probable que les effets seront plus importants encore, en particulier pour les coraux.»* Impossible d'avoir la moindre certitude quantifiée sur le devenir des écosystèmes marins. *«Il est clair que dans les prochaines décennies nous allons sortir de ce que l'on nomme les planetary boundaries, c'est-à-dire les bornes d'évolution naturelles de la planète »,* dit l'océanographe. (5) (6)

L'état de la recherche

«La recherche est très active, en effet environ 62 % des publications sur l'acidification des océans ont été produites depuis 2004, mais un grand nombre de questions cruciales demeurent en suspens. Il nous est très difficile actuellement de préciser les impacts avec suffisamment de précision : les ressources vivantes des océans sont estimées à environ 160 milliards de dollars par an et plus de 100 millions de personnes en vivent directement. Pourtant, nous sommes incapables d'identifier des seuils d'alerte au-delà desquels les effets sur les écosystèmes marins et conséquemment sur l'économie mondiale, seront irréversibles. Beaucoup de travaux se sont focalisés sur quelques espèces seulement et nous manquons encore de recul. Il serait important d'identifier les gènes majeurs impliqués dans la bio-calcification et la régulation de la balance acido-basique. En effet, la mesure de leur "plasticité" d'expression sera déterminante pour calculer les degrés d'adaptabilité des organismes. Même avec une stabilisation du CO2 atmosphérique à 450 ppm, l'acidification des océans aura de profondes et durables répercussions sur nombre d'écosystèmes marins »(4) indique Gilles Boeuf, professeur à l'université Pierre-et-Marie-Curie et président du MNHN.

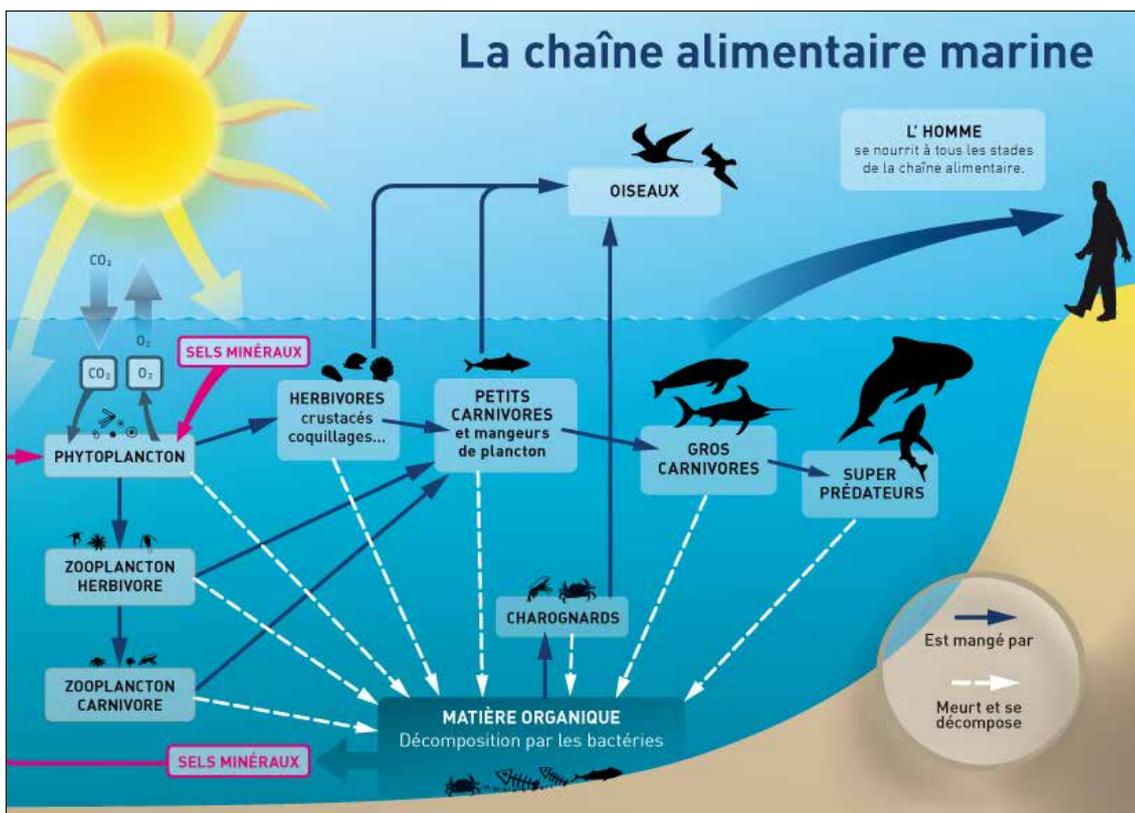
En guise de conclusion

Les conséquences environnementales du changement climatique et de l'acidification des océans pourraient être dignes d'un scénario de film catastrophe. En effet, à plus ou moins brève échéance, voilà ce qu'il va se passer si une réduction très importante des émissions de dioxyde de carbone et également d'autres gaz comme le méthane, l'oxyde nitreux et les hydrocarbures halogénés, n'a pas lieu :

- Modification voire extinction d'un certain nombre d'écosystèmes
- Destructions de séquences essentielles de la chaîne alimentaire (voire les conséquences de l'acidification sur le phytoplancton et le zooplancton)
- Montée significative des océans par la fonte de la banquise, avec un recouvrement de nombreuses surfaces émergées.

Dans notre introduction nous indiquions que selon l'ONU plus de 2,6 milliards d'êtres humains dépendent principalement des océans pour leurs besoins en protéines, et plus de 2,8 milliards de personnes vivent à moins de cent kilomètres de leurs côtes.

Il est donc clair que tous ces phénomènes qui modifieront la vie de l'océan et donc de la planète Terre, ne seront pas sans conséquence sur l'espèce humaine et sa survie, tout simplement.



(1) Fogeron et Vignon_biodiversité

(2) www.saga-geol.asso.fr/Geologie_page_conf_micropaleontologie.html - La micropaléontologie, Robert Mathieu, Maître de conférences à Paris VI

(3) www.plancton-du-monde.org/module-formation/coccolithes.html

(4) L'acidification des océans, par Gilles Boeuf, professeur à l'université Pierre-et-Marie Curie, président du MNHN

(5) www.lemonde.fr/biodiversite/article/2014/10/08/l-acidification-des-occeans-aura-d-importantes-consequences-pour-la-biodiversite_4502183_1652692.html

(6) www.cbd.int/cop/

(7) www.cnrs.fr/cw/dossiers/dospoles/alternative14.html