

Version française de l'article "The consequences of an increase of the atmospheric CO₂ concentration, a global survey of our current state of knowledge", accepted for publication in the proceedings of the 4th World Engineers Convention

Les conséquences de l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique, état de la connaissance scientifique à fin 2010

Keller Jean-Claude¹, Haldi Pierre-André²

1 Maître de physique au gymnase de Morges

2 Professeur à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

Résumé : L'actuelle et rapide augmentation du taux de CO₂ atmosphérique, et des autres gaz à effet de serre, est due aux activités humaines. La vitesse de cette augmentation pourraient conduire à de sérieuses modifications de notre environnement. Cet article présente un résumé de la connaissance scientifique actuelle sur les 2 conséquences majeures de cette augmentation de gaz carbonique atmosphérique : le réchauffement climatique global et l'acidification des océans. Dans ces deux domaines, des évidences scientifiques indiscutables sont publiées dans les revues scientifiques; elles concernent la paléoclimatologie, l'interaction entre les molécules de CO₂ et le rayonnement infrarouge terrestre, les mesures satellitaires, le pH des eaux océaniques, etc... L'augmentation de l'effet de serre et l'acidifications des océans est une réalité due aux rejets anthropiques de CO₂, conséquence de notre consommation d'énergie fossile, malgré les affirmations contraires des "climato-sceptiques".

1. Introduction

Depuis toujours, les activités des êtres humains influencent l'environnement dans lequel ils vivent. Par exemple avec l'agriculture, le déboisement, ou encore l'irrigation, les êtres humains ont toujours exercé une pression plus ou moins importante sur la nature. Mais avec l'apogée de l'ère industrielle, ainsi que l'augmentation de la population mondiale, cette pression est devenue tellement importante qu'elle pourrait conduire à des vitesses de modification de notre environnement encore jamais atteintes. Cela pourrait avoir des conséquences sans commune mesure avec tout ce que nous avons déjà connu par le passé. Aujourd'hui, les êtres humains consomment chaque seconde plus de 155'000 litres de pétrole, environ 90'000 m³ de gaz et plus de 200'000 kg de charbon [2]. Cette consommation d'énergie fossile a entraîné, une augmentation du taux de CO₂ atmosphérique de 280 ppm aux environs de 1850 à 388 ppm en 2010. De plus, l'augmentation moyenne mesurée entre 1995 et 2005 a été de 1,9 ppm par année, c'est considérable comparé aux 0,0002 ppm d'augmentation moyenne annuelle enregistrée au cours des 650'000 dernières années [1]. Aujourd'hui, nos rejets de gaz carbonique influencent considérablement notre environnement et modifient certains équilibres naturels. L'évolution de ces rejets dépendra de facteurs technologique, politique, économique et démographique. Les solutions technologiques seront

proposées par les ingénieurs et passeront certainement par l'efficacité énergétique et probablement par la séquestration du carbone. Enfin, un effort pédagogique d'information aux populations sur les enjeux climatique et énergétique doit être fait et là aussi les ingénieurs ont leur place.

Cet article entend présenter l'état actuel des connaissances concernant les deux conséquences principales dues à cette augmentation du taux de CO₂ atmosphérique et qui sont :

- 1) la modification du bilan de l'énergie radiative au sein de l'atmosphère qui est à l'origine du réchauffement climatique global,
- 2) la modification du potentiel hydrogène (pH) des océans qui pourrait mettre en péril toute la chaîne alimentaire.

L'information présentée est une synthèse des connaissances publiées dans les revues scientifiques.

2. Le rôle du CO₂ dans le réchauffement climatique

Il y a des faits qui ne sont contestés par personne :

- Au cours des cent dernières années (1906 – 2005), la température moyenne à la surface de la Terre a augmenté de 0,74°C [1].
- La concentration de gaz carbonique (CO₂) atmosphérique a passé de 280 ppm (valeur préindustrielle) à 388 ppm (valeur en 2010), alors que cette concentration ne s'était accrue que de 20 ppm au cours des 8000 dernières années [1].
- Le CO₂ est un Gaz à Effet de Serre (GES), il interagit avec l'énergie électromagnétique infrarouge qui traverse l'atmosphère [15].

Par contre, les explications des causes du réchauffement observé au cours des cent dernières années font l'objet de controverses. Les nombreux rapports publiés par le GIEC font état du rôle majeur joué par le CO₂ par augmentation de l'effet de serre. Mais les conclusions du GIEC sont contestées par un groupe de scientifiques, appelés « climato-sceptiques ». Ces derniers contestent le fait que le CO₂ atmosphérique puisse participer au réchauffement climatique. Ils contestent l'importance attribuée aux GES, décrite dans les rapports publiés par le GIEC.

Que montrent les études de paléoclimatologie ?

Les études conduites en paléoclimatologie mettent en évidence que, durant les périodes interglaciaires de réchauffement climatique, la concentration de CO₂ atmosphérique joue un rôle essentiel par l'effet de serre. Les publications majeures faites dans ce domaine [9, 10, 11, 12, 13, 14] évoquent :

- 1) la corrélation qu'il y a entre les cycles astronomiques de Milankovitch et les périodes glaciaires et interglaciaires sur Terre,
- 2) les différences de comportement entre l'hémisphère nord et l'hémisphère sud durant les périodes de réchauffement,
- 3) le rôle de la glace et du CO₂ dans les périodes de réchauffement interglaciaire.

L'article récent (25 juin 2010) de G.H. Denton explique le déroulement de l'avant-dernière période interglaciaire. Il met en évidence qu'une période interglaciaire ne peut pas démarrer uniquement par l'augmentation de l'ensoleillement due aux cycles de Milankovitch. Il est indispensable qu'il y ait aussi une débâcle avec la fonte des glaces dans l'Atlantique nord (figure 1), débâcle telle qu'elle entraîne une perturbation de tous les courants océaniques avec une remontée des eaux profondes dans l'hémisphère sud. Cette remontée des eaux va libérer de grandes quantités de CO₂ dans l'atmosphère, ce qui entraîne à son tour un fort réchauffement dû à l'effet de serre induit par ce CO₂. Les auteurs de cet article ont mis en évidence qu'en phase de glaciation il y a des augmentations d'ensoleillement sans que cela entraîne un renversement de tendance climatique. **C'est donc le CO₂ et non le soleil qui est responsable du réchauffement observé durant les périodes interglaciaires [14].**



Figure 1 : illustration de la débâcle glaciaire dans l'hémisphère nord [14]

Qu'en est-il de l'effet de serre ?

Les GES sont des molécules (H_2O , CO_2 , CH_4 , l'ozone, les CFC, ...) qui interagissent avec le rayonnement électromagnétique infrarouge. Elles absorbent l'énergie de certaines parties du spectre infrarouge du rayonnement terrestre, pour ensuite la transmettre aux molécules voisines. Cette interaction peut se mesurer en laboratoire.

La figure 2 présente le spectre d'absorption de la molécule de CO_2 , mesuré par Jacques Gentili au Laboratoire des Sciences de la Matière de l'École Normale Supérieure de Lyon [15]. Ces mesures mettent en évidence une absorption de l'énergie par le CO_2 à $4,3\mu\text{m}$ et à $15\mu\text{m}$.

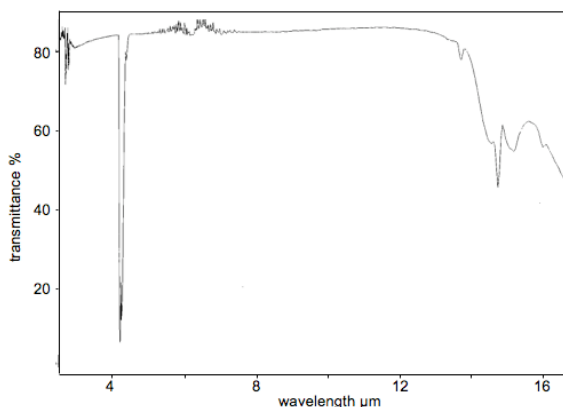


Figure 2 : spectre d'absorption du rayonnement infrarouge par la molécule de CO_2 [15]

L'interaction entre l'énergie infrarouge émise par la surface de la Terre et l'atmosphère est évidemment extrêmement complexe puisqu'il s'agit d'interactions entre des photons et des molécules. Ces interactions entre l'énergie électromagnétique et la matière dépendent des conditions de l'équilibre thermodynamique local.

Les photons infrarouges qui traversent l'atmosphère interagissent avec les différentes molécules de GES qu'ils rencontrent. Ces molécules absorbent ces photons, puis deviennent, elles-mêmes, émettrices d'énergie. Dans la basse atmosphère, là où règne des conditions d'équilibre thermodynamique local, l'énergie absorbée par les molécules de GES est essentiellement transmise par collision avec les molécules voisines, principalement N_2 et O_2 . En effet, la densité et la température dans la basse atmosphère sont telles que, le temps nécessaire pour la réémission d'un photon IR par les molécules de GES excitées, est

beaucoup plus grand que le temps qui s'écoule entre 2 interactions successives dues à l'agitation thermique des molécules atmosphériques. Dans la haute atmosphère, région où la densité est faible et où il n'y a pas d'équilibre thermodynamique local, c'est le phénomène de la réémission de photons IR par les molécules de GES qui domine. Ainsi, les photons IR absorbés par les différentes molécules de GES sont réémis dans toutes les directions, y compris vers le bas. Dans cette région de la haute atmosphère, il est aussi possible que les molécules de GES soient excitées par l'agitation thermique de leurs voisines et libèrent cette énergie absorbée sous la forme d'un photon IR.

En résumé, une partie importante du flux de l'énergie infrarouge émise par la Terre est interceptée par les GES. Dans la basse atmosphère, cette énergie absorbée est réémise principalement sous forme d'énergie interne (agitation thermique), alors que dans la haute atmosphère cette énergie absorbée est réémise dans toutes les directions sous forme d'énergie électromagnétique IR. Tous ces phénomènes physiques constituent ce qu'on appelle l'effet de serre. Le bilan énergétique global de toutes ces interactions est un flux d'énergie électromagnétique IR qui quitte l'atmosphère pour se propager dans l'espace. Ce flux est composé des photons IR qui ont pu traverser l'atmosphère sans être interceptés, ainsi que des photons IR qui ont été émis vers le haut par les molécules de GES présentes dans la partie supérieure de l'atmosphère. Ce flux d'énergie IR, émis en direction de l'espace, est inférieur à celui émis par la surface de la Terre [16].

Les climatologistes considèrent que ces flux infrarouges interceptés par les molécules de CO₂ sont négligeables dans le bilan énergétique de la Terre. Une preuve que tel n'est pas le cas est qu'il est possible de les mesurer à différentes altitudes par satellite depuis l'espace. Cette détection de flux infrarouges est même à la base de la technique de mesure utilisée dans le projet Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT), voir [19].

Qu'en est-il des grands courants de convection atmosphérique ?

Dans les zones équatoriales et tropicales, la Terre reçoit beaucoup plus d'énergie par unité de surface que dans les régions polaires. Les grands courants de convection océaniques et atmosphériques permettent de transporter une partie de l'énergie intertropicale en direction des pôles. En ce qui concerne l'atmosphère, ces grands courants convectifs sont organisés sous formes de cellules plus ou moins actives (cellules de Hadley, cellules de Ferrel, cellules polaires, cellules Walker). La question est de savoir si l'ordre de grandeur de cette énergie convective est aussi important que l'ordre de grandeur de l'énergie radiative due à l'effet de serre. Des informations à ce sujet figurent dans les documents [1] et [4], la figure 3 présente l'ordre de grandeur de ces différents flux verticaux.

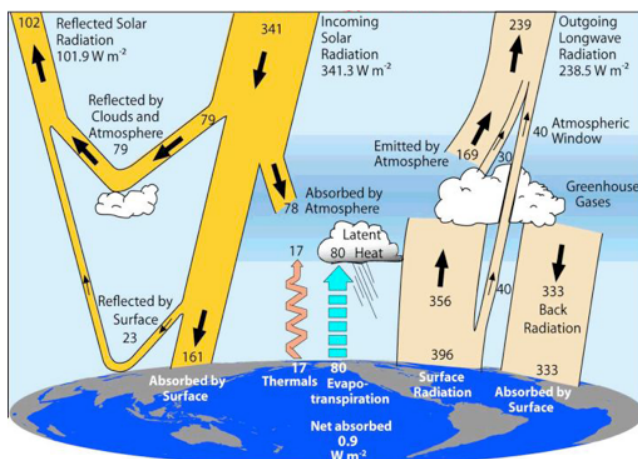


Figure 3 : Illustration de la moyenne annuelle globale du bilan énergétique de la Terre pour la période de mars 2000 à mai 2004 ($W m^{-2}$) [4]

Comme on peut le voir sur la figure 3, les flux infrarouges dirigés vers le haut et vers le bas, dus à l'ensemble des gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère, sont supérieurs à 500 W/m^2 , alors que les flux convectifs, y compris les flux dus à la chaleur latente de l'eau, sont très légèrement supérieurs à 100 W/m^2 .

Il y a une grande différence entre ces 2 types de flux. Les flux infrarouges sont présents en permanence et partout dans l'atmosphère. Par contre, les flux convectifs n'existent que dans certaines régions atmosphériques et ils sont intermittents. En général l'atmosphère est stable, c'est-à-dire stratifiée, et ce sont les mouvements horizontaux qui dominent. Les grands déplacements verticaux n'existent qu'en des endroits particuliers et dans des conditions particulières. Ils sont bien visibles sur la figure 4 sous la forme de « paquets blancs » dans la région équatoriale. Ailleurs, les zones d'ascendance et de subsidence sont créées au gré des hautes et des basses pressions. Il n'est donc pas étonnant qu'en moyenne les flux infrarouges soient beaucoup plus importants que les flux convectifs.

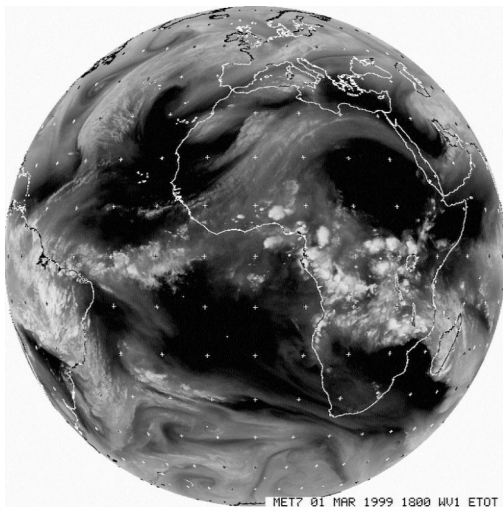


Figure 4 : image Meteosat [15]

Affirmer, comme le font les climatosceptiques, que les flux radiatifs dus au CO_2 atmosphérique ne jouent pas de rôle dans le réchauffement climatique actuel ne résiste pas à une analyse scientifique sérieuse [16].

Que voit-on depuis l'espace ?

Voilà près de 50 ans que la Terre est observée par des satellites, mais l'observation satellitaire dédiée à la mesure du taux de CO_2 atmosphérique n'a commencé qu'en 2004 avec la mise sur pied du projet Greenhouse gases Observing SATellite (GOSAT) [19, 20]. GOSAT est un projet commun au MOE (Ministry of the Environment), à JAXA (Japan Aerospace Exploration Agency) and au NIES (National Institute for Environmental Studies).

Actuellement, les techniques de mesures qui permettent de cartographier la concentration atmosphérique de CO_2 à partir de satellites sont basées sur des mesures dans l'infrarouge proche (en anglais Near InfraRed) à $1,6\mu\text{m}$ et à $2\mu\text{m}$ et dans l'infrarouge thermique (en anglais thermal InfraRed) à $4,3\mu\text{m}$ et à $15\mu\text{m}$ [18].

Lancé le 23 janvier 2009, le satellite japonais IBUKI nous envoie depuis maintenant 2 ans des mesures permettant de cartographier le taux de CO_2 atmosphérique. Ces données sont en cours d'étude et il est encore trop tôt pour en tirer des conclusions.

OCO (Orbiting Carbon Observatory) est un projet américain qui est destiné notamment à la mesure du taux de CO_2 atmosphérique. Après l'échec, le 24 février 2009, du lancement du satellite OCO-1, la NASA a décidé de préparer une nouvelle mission OCO-2 dont le lancement est prévu pour février 2013. Ce satellite ira rejoindre un train satellitaire (figure 5), appelé A-Train [21].

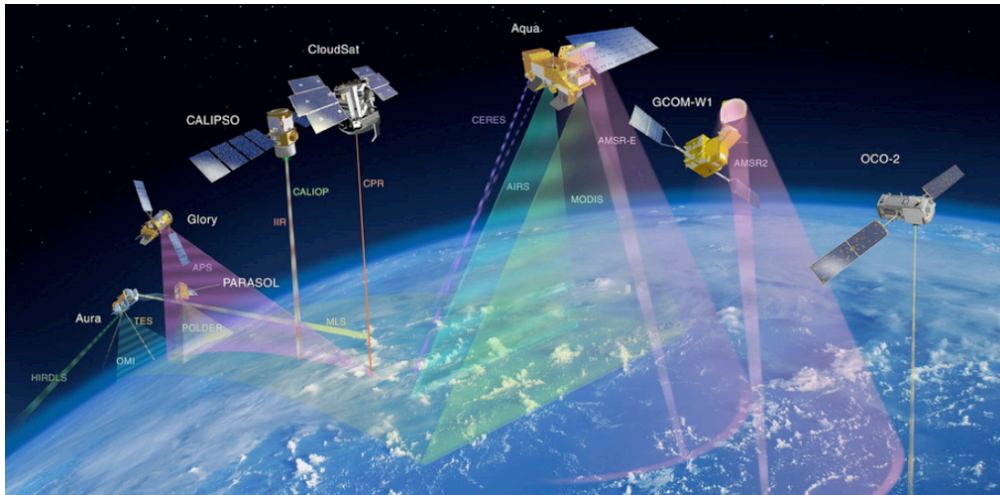


Figure 5 : A-Train, illustration credit NASA

Ces 2 exemples démontrent que, non seulement de gros efforts sont faits pour surveiller l'évolution du taux de CO₂ atmosphérique, mais que l'absorption du rayonnement infrarouge par le CO₂ est une réalité mesurable.

Malheureusement, la mise en orbite du satellite Glory, qui est représenté sur la figure 5, a échoué le 4 mars 2011. Ce satellite aurait permis d'améliorer notre connaissance sur le budget énergétique de la Terre (<http://glory.gsfc.nasa.gov>).

3. Le rôle du CO₂ dans l'acidification des océans

Le potentiel hydrogène (pH) est une mesure de l'acidité d'un milieu. Un pH supérieur à 7 indique un milieu basique, un pH inférieur à 7 correspond à un milieu acide et plus le pH est faible plus l'acidité est importante. La diminution du pH des océans est un fait qui est observé par tous les scientifiques qui étudient le milieu marin. Leurs études montrent clairement que cette diminution du pH est due à l'augmentation du taux de CO₂ atmosphérique. Le pH moyen des eaux de surface est actuellement d'environ 8.05 (figure 6). Il a diminué de 0.1 depuis le début de l'ère industrielle et cette diminution est 100 fois plus rapide que tout changement subit par les organismes marins depuis au moins 20 millions d'années [3].

Cette augmentation d'acidité, due aux activités humaines, continue à une vitesse telle que les océans pourraient, d'ici la fin du XXI^{ème} siècle, devenir corrosifs pour l'aragonite présent dans les coquilles de certains organismes marins [3].

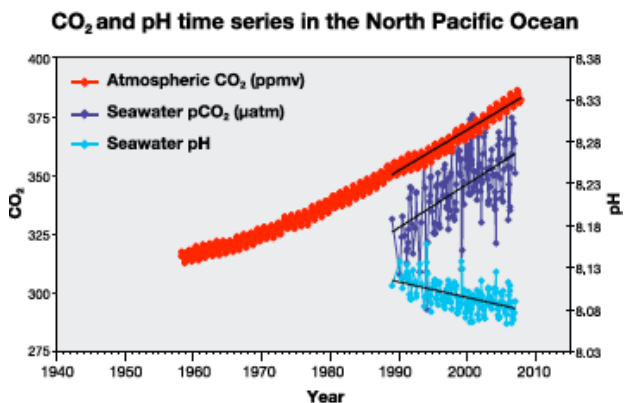


Figure 6 : valeurs du taux de CO₂ et du pH dans l'hémisphère nord [3]

Il est important de préciser que cette variation du pH est le résultat direct de nos émissions de CO₂ et non pas une conséquence indirecte du réchauffement climatique. En effet, le CO₂ se dissout dans l'eau où il intervient chimiquement dans les réactions principales suivantes :

1. hydrolyse partielle en ions carbonates (réaction réversible) :

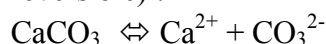


La dissociation du gaz carbonique va ainsi accroître la concentration des ions H⁺ et donc diminuer le pH des eaux. Il est possible que cette diminution du pH finisse par entraîner une acidose métabolique sur les organismes marins supérieurs [6].

2. réaction avec les ions CO₃²⁻ déjà présents dans les eaux (réaction réversible) :



Cette réaction va diminuer la concentration en ions CO₃²⁻. Cette diminution des ions carbonates va modifier l'équilibre qui existe entre le carbonate de calcium solide (CaCO₃), ou calcaire, et les ions Ca²⁺ et CO₃²⁻ en solution dans l'eau (réaction réversible) :



La condition d'équilibre implique que le produit des concentrations en ions Ca²⁺ et en ions CO₃²⁻ reste constant. Autrement dit, si la concentration des ions carbonates décroît, la condition d'équilibre n'est plus satisfaite et cela conduit à la dissolution du calcaire solide présent dans les eaux. Cette dissolution augmente la concentration en ions calcium et en ions carbonates, de telle façon que l'équilibre soit rétabli.

Ce calcaire solide qui se dissout provient de deux formes cristallines : la calcite et l'aragonite, or les coquilles et les exosquelettes des mollusques marins sont construits à partir de l'une ou l'autre de ces formes solides, voire d'une combinaison des deux.

Avec une concentration de CO₃²⁻ inférieure à 66 micromoles par kg, l'eau n'est plus saturée en aragonite, et alors l'aragonite devient soluble dans l'eau (figure 7). En dessous de cette limite, la production d'aragonite par les organismes vivants diminue. Des micro-mollusques comme les ptéropodes (dont la coquille est en forme de cône), maillon essentiel de la chaîne alimentaire aux hautes latitudes, sont particulièrement menacés par ces modifications chimiques de l'eau [5].

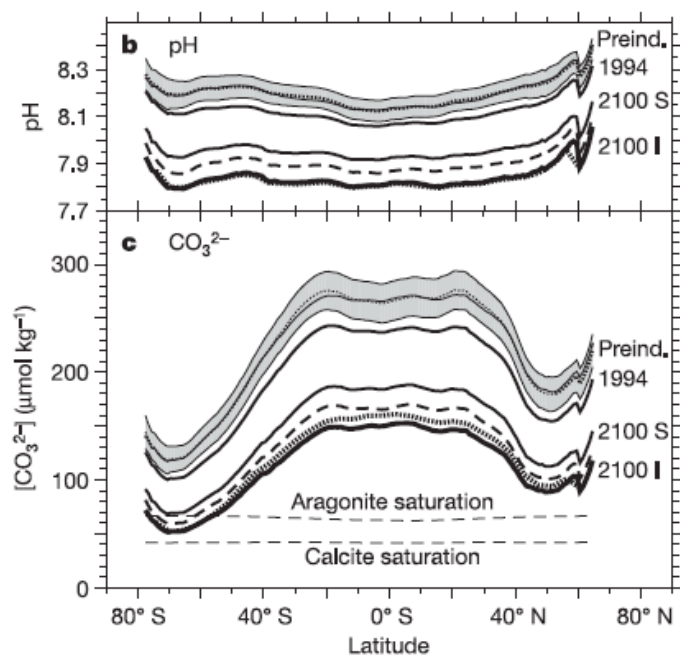


Figure 7 : diminution du pH et du CO₃²⁻ des eaux océaniques de surface [5]

D'après C. Orr [5], les eaux de surface des océans aux hautes latitudes pourraient atteindre cette limite de 66 micromoles par kg d'ici la fin du XXI^{ème} siècle et provoquer une disparition des ptéropodes (figure 8). Cela aurait des conséquences dramatiques pour tous les animaux qui se nourrissent de ces microorganismes (certaines espèces de zooplancton, saumons, harengs, maquereaux, baleines, etc...).

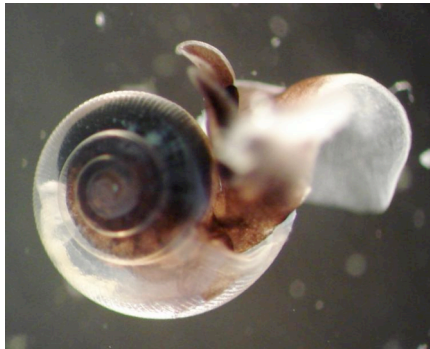


Figure 8 : *Pteropod arctic Limacina helicina* (Spitzberg), © S. Comeau, LOV [22]

Il y a 55 millions d'années à la fin du paléocène, lors du « maximum thermique du Paléocène – Eocène », il y a eu un épisode de forte augmentation de l'acidité des eaux, du taux de CO₂ atmosphérique et de la température moyenne. Le pH a diminué très rapidement, en quelques centaines d'années seulement ; ensuite, il a fallu une centaine de milliers d'années pour que les océans retrouvent les conditions de départ. Ces événements ont causé une importante extinction d'espèces vivantes [8].

Aujourd'hui, la vitesse de l'acidification des océans est 10 fois plus rapide. A ce sujet, voici ce que dit le groupe d'experts « The Ocean Acidification Reference User Group (2010) » [8] : « Le CO₂ atmosphérique augmente aujourd'hui beaucoup trop rapidement par rapport à la vitesse du mélange de l'océan, rompant ainsi l'équilibre des périodes passées. Le résultat est que l'essentiel des émissions de CO₂ s'accumule dans la couche superficielle de l'océan. Environ 50 % de tout le CO₂ que nous avons émis réside dans les 10 % supérieurs de l'océan. La capacité des sédiments à réguler la chimie des océans et à neutraliser l'acidité est tout simplement trop lente - plus de 1000 ans - le pH océanique et la quantité d'ions carbonates sont donc en train de diminuer. ».

4. Conclusion

Les connaissances actuelles montrent clairement que l'augmentation de la concentration de CO₂ atmosphérique est le principal responsable de l'augmentation du réchauffement climatique par effet de serre et de l'acidification des océans. La vitesse de ces modifications est telle qu'elle pourrait entraîner des changements de notre environnement d'une rapidité et d'une ampleur jamais connue jusqu'ici [1, 8, 17]. Cela est illustré sur la figure 9.

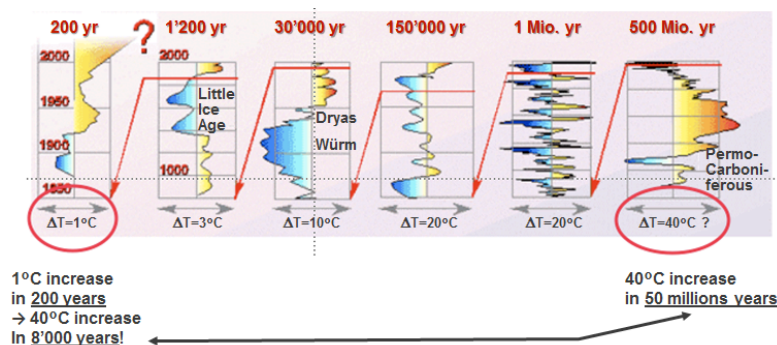


Figure 9 : illustration de l'actuelle accélération de l'augmentation des températures de surface de la Terre en comparaison des augmentations qui se sont produites par le passé [23].

Bien que les risques soient potentiellement sans précédent dans l'histoire humaine, la communauté internationale a encore de la peine à se mobiliser pour lutter contre les rejets anthropiques de CO₂. Les enjeux énergétiques, économiques, démographiques et politiques font souvent passer au second plan la volonté de diminuer notre consommation des énergies fossiles et/ou de se donner les moyens de séquestrer à la source le CO₂ ainsi émis. Le développement économique des populations défavorisées, ainsi que l'augmentation de la population mondiale rendent très difficile la diminution rapide des rejets de CO₂. L'amélioration de l'efficacité énergétique est un des facteurs-clés qui peut contribuer à la diminution de ces rejets. Dans ce domaine, les ingénieurs ont un rôle important à jouer et ils sont en mesure d'informer les citoyens sur les options technologiques qui sont à notre disposition, et qui pourraient nous permettre de résoudre ces problèmes. Il est donc utile que les ingénieurs participent à l'effort d'information au public sur ces enjeux climatique et énergétique.

Références

- [1] Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.), IPCC, 2007: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html
- [2] World Oil Outlook 2008, © OPEC Secretariat, 2008, Obere Donaustrasse 93, A-1020 Vienna, Austria, www.opec.org
- [3] A Summary for Policymakers from the Second Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World, Editors: Maria Hood, Wendy Broadgate, Ed Urban and Owen Gaffney. Layout: Hilarie Cutler, IGBP Secretariat, copies are available from:
www.ocean-acidification.net.
- [4] Kevin E. Trenberth, John T. Fasullo and Jeffrey Kiehl, Earth's Global Energy Budget, Center for Atmospheric Research Boulder Colorado, ©2009 American Meteorological Society, doi: 10.1175/2008BAMS2634.1
- [5] James C. Orr and al., Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, *Nature* Vol 437, 29 September 2005, doi: 10.1038/nature04095
- [6] Richard A. Feely, Christopher L. Sabine, and Victoria J. Fabry, Carbon dioxide and our ocean Legacy, téléchargeable : www.pmel.noaa.gov/pubs/PDF/feel2899/feel2899.pdf
- [7] James C. Zachos and al., Rapid Acidification of the Ocean During the Paleocene-Eocene Thermal Maximum, *Science* Vol 308, 10 June 2005, doi: 10.1126/science.1109004
- [8] Making it clear A fresh look at the global problem of ocean acidification for those people who want to know a little more,
epoca-project.eu/index.php/what-do-we-do/outreach/rug/oa-questions-answered.html
- [9] J.R. Petit and al., Climate and atmospheric history of the past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica, *Nature* Vol 399, 3 June 1999, doi :10.1038/20859
- [10] Nicolas Caillon and al., Timing of Atmospheric CO₂ and Antarctic Temperature Changes Across Termination III, *Science* 299, 1728 (2003),
doi : 10.1126/science.1078758
- [11] Renato Spahni and al., Atmospheric Methane and Nitrous Oxide of the Late Pleistocene from Antarctic Ice Cores, *Science* Vol. 310, 1317 (2005),
doi : 10.1126/science.1120132
- [12] Jinho Ahn and al., Atmospheric CO₂ and Climate on Millennial Time Scales During the Last Glacial Period, *Science* Vol. 322, 83 (2008), doi: 10.1126/science.1160832
- [13] Aradhna K. Tripathi, Coupling of CO₂ and Ice Sheet Stability Over Major Climate Transitions of the Last 20 Million Years, *Science* Vol. 326 (4 December 2009),
doi: 10.1126/science.1178296
- [14] G.H. Denton, R.F. Anderson, J.R. Toggweiler, R.L. Edwards, J.M. Schaefer, A.E. Putnam, The Last Glacial Termination, *Science* Vol. 328, 1652 (2010),
doi: 10.1126/science.1184119

- [15] Vincent Daniel, Le rayonnement thermique, bilan radiatif et effet de serre. Partie II : Interactions du rayonnement solaire avec l'atmosphère, ENS-Lyon
<http://planet-terre.ens-lyon.fr/planetterre/XML/db/planetterre/metadata/LOM-bilan-radiatif-terre2.xml#debut>
- [16] Joshua B. Halpern and al. , Comment on “Falsification of the atmospheric CO₂ greenhouse effects within the frame of physics”, International Journal of Modern Physics B, Vol. 24, October 2010, doi: 10.1142/So21797921005555X
- [17] Fact Sheet 7 May 2007, Ocean acidification – The other half of CO₂ problem
http://www.eur-oceans.info/medias/documents/FS7_oceanAcidification.pdf
- [18] Sensitivity Analysis and Application of KLIMA Algorithms to GOSAT and OCO Validation, Technical and Financial Proposal, prepared for ESA-ESRIN in response RFQ/3.12339/08/I-OL, prepared by IFAC-CNR and University of Bremen
- [19] GOSAT User Interface Gateway (GUIG)
<http://data.gosat.nies.go.jp/GosatUserInterfaceGateway/guig/GuigPage/open.do>
- [20] GOSAT project
http://www.gosat.nies.go.jp/index_e.html
- [21] A-Train Satellite Constellation
<http://science.nasa.gov/earth-science/a-train-satellite-constellation/>
- [22] Acidification des océans : impacts sur des organismes-clés de la faune océanique, www.annee-polaire.fr/ipev/actualites/scientifiques/publications/acidification_des_océans_impact_sur_des_organismes_cles_de_la_faune_oceanique.html
- [23] Guy Blanchet, Roger Goullier, Le réchauffement climatique entre mythes et réalité, Université Claude-Bernard-Lyon I,
<http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/transv/DevDur/DevdurScient2.htm>

Figures

- Fig 1 G.H. Denton, R.F. Anderson, J.R. Toggweiler, R.L. Edwards, J.M. Schaefer, A.E. Putnam, The Last Glacial Termination, The Last Glacial Termination, Science 328 1652 (2010), doi: 10.1126/science.1184119
- Fig 2 Le spectre d'absorption du CO₂ a été réalisé par Jacques Gentili du Laboratoire des Sciences de la Matière de l'École Normale Supérieure de Lyon
- Fig 3 IPCC Fourth Assessment Report : Climate Change 2007 : Working Groupe I : The physical Science Basis
http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/faq-1-1.html
- Fig 4 Image Meteosat, source [15]
- Fig 5 A-Train, credit NASA, source :
<http://www.flickr.com/photos/gsfsc/sets/72157625867642472/show>
- Fig 6 Richard A. Feely, Pacific Marine Environmental Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, USA, with atmospheric data from Pieter Tans and seawater data from David Karl. Adapted from Feely (2008) in Levinson and Lawrimore (eds), Bull. Am. Meteorol. Soc, 89(7): S58
- Fig 7 James C. Orr and al., Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms, Nature Vol 437, 29 September 2005
- Fig 8 photo published on :
www.annee-polaire.fr/ipev/actualites/scientifiques/publications/acidification_des_océans_impact_sur_des_organismes_cles_de_la_faune_oceanique.html
- Fig 9 Guy Blanchet, Roger Goullier, Le réchauffement climatique entre mythes et réalité, Université Claude-Bernard-Lyon I,
<http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/transv/DevDur/DevdurScient2.htm>