

Séance du 11 mai 2015

## Le changement climatique, entre conjectures et mutations sociétales

par Bernard AUBERT

---

### MOTS-CLÉS

Glaciers - Effets de serre - Climatologie - Modélisations - Énergies renouvelables - Convention-cadre des Nations Unies.

### RÉSUMÉ

Les lois de la géophysique sont le principal métronome des variations périodiques du climat de la Terre. Les indicateurs d'un dérèglement climatique d'origine anthropique soulèvent des questions inédites et difficiles. Ce n'est qu'au milieu des années 1980 qu'ils ont envahi le champ de la politique internationale pour faire prévaloir le droit de chaque nation à la satisfaction de besoins essentiels des populations dans une dynamique de développement équitable. Il reste que la climatologie est une science jeune confrontée à la résolution de problèmes d'une très grande complexité. Elle dispose de données de plus en plus fines couvrant l'ensemble de la surface du globe et doit optimiser le traitement de données massives en vue de modélisations fiables pour la prise de décision.

---

Que le climat de notre planète soit soumis à des variations périodiques de grande ampleur, n'est plus contestable. Il y a 20 000 ans avant le présent, l'emprise des glaciers du Mont Blanc atteignait la banlieue lyonnaise, l'homme maîtrisait déjà le langage, enterrait ses morts et pratiquait l'art pariétal. La Méditerranée était une mer froide avec un niveau d'une centaine de mètres plus bas que l'actuel. La preuve en est la grotte Cosquer près de Marseille, loin du rivage, où nos ancêtres du Solutréen ont laissé des représentations de phoques et grands-pingouins (Fig. 1). Aujourd'hui



son couloir d'accès est à 40 mètres sous l'eau dans la paroi des calanques, et le développement des savoirs nous a appris que le flux énergétique reçu de notre astre solaire, loin d'être constant, est régi par tout un ensemble de paramètres qui président aux destinées singulières de notre climat.

Fig. 1 : Grand-pingouin de la Grotte Cosquer

Au cours des cinquante dernières années, les études conduites par les glaciologues et les climatologues, nous ont révélé combien la Terre est une machine complexe et fragile. Pour ce qui concerne le monde du vivant, elle peine à s'autoréguler sans occasionner de bouleversements, d'où l'obligation faite à chaque espèce, de constamment s'adapter pour assurer sa survie. Notre civilisation moderne, avec toutes ses avancées et ses infrastructures, née dans un monde et un climat qu'elle croyait stables, s'étonne à l'idée d'un basculement possible de nos saisons que nous aimerions immuables<sup>(1)</sup>. Serions-nous sous l'emprise d'une angoisse obsessionnelle nous faisant douter de l'ingéniosité d'*Homo sapiens* à élucider des problèmes qu'il se serait créé ?

Membre de la Société Royale des Sciences de Montpellier, Jacques-Antoine Mourgue de Montredon fut l'un des tout premiers érudits à attribuer, avec enregistrements météorologiques à l'appui, une cause naturelle à un dérèglement climatique survenu durant l'été 1783. Il s'agissait du "brouillard sec et jaune", émis par le volcan islandais Laki et dont l'activité perdura une centaine de jours. Le phénomène toucha une grande partie de l'Europe et l'insuffisance d'ensoleillement combinée aux retombées d'oxyde de soufre fut à l'origine de graves pertes infligées aux récoltes de céréales<sup>(2, 3)</sup>.

Même si le bilan du flux d'énergie solaire dont dépend la température moyenne de notre globe est difficile à appréhender, on sait aujourd'hui que le climat peut basculer en affectant un hémisphère ou des latitudes plus que d'autres. Les littoraux situés en périphérie des grandes masses d'échange thermique "eau/atmosphère" seraient les zones les plus exposées aux risques d'un réchauffement généralisé. Il en va ainsi des pays côtiers du Pacifique soumis aux alternances de niveau marin associées aux courants océaniques "Niño/Niña", de même que les pays riverains de la mer Méditerranée laquelle est exposée à d'intenses phénomènes d'évaporation. Toutes ces façades maritimes densément peuplées sont particulièrement vulnérables. Le schéma qui prévaut est que le changement climatique agit sur un système à plusieurs compartiments avec des effets de rétroaction, identifiables au niveau des calottes polaires, de la banquise, des glaciers et, en bout de chaîne, de la circulation des grands courants océaniques.

Si les lois de la géophysique et de l'astrophysique restent le principal métronome des variations périodiques de notre climat, y a-t-il des indicateurs laissant penser que les conséquences anthropiques de l'ère industrielle pourraient les infléchir ? En ce début de XXI<sup>e</sup> siècle, obligation nous est faite de prendre en compte des phénomènes annonciateurs qui s'inscrivent dans une évolution perceptible, notamment pour l'agriculture et l'eau. Y faire face par anticipation serait de nature à éviter les réactions tardives. Car en définitive si l'activité humaine est bien à l'origine de ces dérèglements, ne pourrait-elle en être aussi la solution<sup>(4)</sup> ? Tel sera le cheminement de notre réflexion en ces temps où la question climatique mobilise l'opinion et les instances internationales.

## Glaciers, mémoire de notre planète

Dès 1875, l'écossais James Croll<sup>(5)</sup> estime que les variations de l'orbite terrestre rythment les cycles de notre climat. Mais il reviendra au serbe Milutin Milankovitch de préciser en 1920 de quelle manière différents paramètres orbitaux commandent les successions de glaciations-déglaciations<sup>(6)</sup>. L'excentricité de

l'orbite terrestre s'aplatit avec deux cycles de 400 000 ans et 100 000 ans respectivement, alors que l'obliquité de l'axe de rotation de la terre varie quant à elle selon une périodicité de 41 000 ans. La précession des équinoxes, due au fait que notre planète oscille comme une toupie, montre deux périodicités de 19 000 et 23 000 ans.

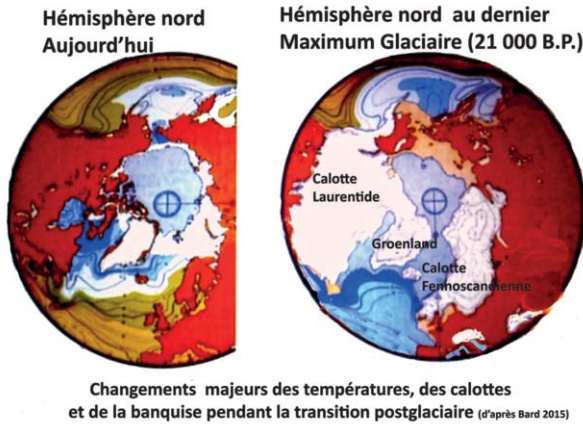


Fig. 2 Dernière grande évolution postglaciaire

vidange des eaux de fonte qui peuvent perturber des équilibres de circulation thermohaline, et occasionner de brusques changements de trajectoire des grands courants océaniques.

Toute cette horlogerie orbitale on le voit se répercute de façon subtile et parfois brutale sur notre climat. Glaciologues, astrophysiciens et climatologues n'ont pas manqué de confronter la séquence des périodes glaciaires, dont la figure 2 illustre l'épisode le plus récent, avec les grands cycles de flux énergétique solaire parvenant à notre planète.

Tout commence lorsque le danois Willi Dansgaard analyse, en 1952, la composition isotopique de l'oxygène de l'eau de pluie. Il s'aperçoit que celle-ci est plus riche en  $^{18}\text{O}$  lors d'un front chaud et en déduit que le calcul des rapports isotopiques  $^{16}\text{O}$  et  $^{18}\text{O}$  dans la profondeur des glaces pourrait faire office de paléothermomètre.

En effet les petites bulles d'air fossiles, occluses à l'intérieur de la glace, conservent non seulement la mémoire de la température ambiante de la Terre au moment où la glace s'est formée, grâce au rapport  $^{16}\text{O} / ^{18}\text{O}$ , mais aussi leur teneur fossile en dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$ , ainsi qu'en méthane  $\text{CH}_4$  et autres gaz. Par ailleurs l'âge de la glace pourra être obtenu par datation carbone 14 à partir des impuretés terrigènes qu'elle contient. Dès lors il devient possible non seulement d'identifier l'empreinte des paramètres orbitaux de notre globe sur les changements de température à l'origine des glaciations, mais aussi de relier ces paramètres aux variations du niveau marin reconstruites à partir de sédiments côtiers. Dansgaard participera au premier carottage conduit au Groenland en 1966 dont il conservera précieusement les caisses d'échantillons en chambre froide. A travers une lecture fine des concentrations d'oxygène isotopique, il en déduit des réchauffements extrêmement brusques, pouvant dépasser 3 à 5°C en quelques siècles (7).

Autant de phénomènes qui interfèrent sur la quantité d'énergie solaire parvenant jusqu'à la Terre. Mais d'autres facteurs sont également à prendre en considération comme la formation des taches solaires dont le cycle moyen d'apparition est d'environ 11 à 12 ans, ou encore d'accidentelles émissions de cendres volcaniques qui voilent provisoirement la troposphère. Derniers éléments et non des moindres, la fonte des glaces et la

Un exemple de réchauffement parmi d'autres, est l'épisode exceptionnel de notre dernière déglaciation qui a précédé l'avènement de l'Holocène. Amorcé il y a 15 000 ans il fut marqué par un pic de remontée spectaculaire du niveau marin, atteignant jusqu'à 50 mm/an. Mis en évidence dans l'analyse des profils de glaces polaires, cet épisode a été confirmé par des études plus récentes de carottage dans les récifs coralliens des eaux du Pacifique et des Caraïbes, sous la direction du climatologue Edouard Bard (8). Le résultat est présenté en figure 3, avec des points de couleur correspondant à différentes campagnes de mesure.

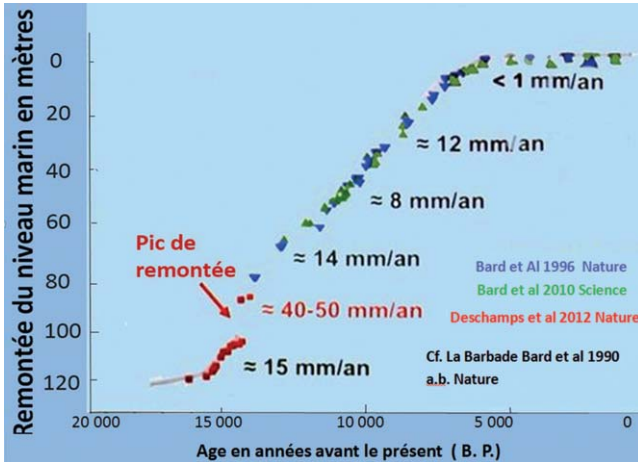


Fig. 3 Remontée du niveau marin depuis 15 000 ans

Des analyses complémentaires du Centre de recherche atmosphérique des USA et de l'Université de Wisconsin conduites sous la direction de Jérémy D. Shakun (9), ont permis d'élucider la séquence de cet événement. Au départ c'est l'orbite terrestre qui varie selon les lois de la mécanique céleste. S'ensuit une augmentation de l'insolation laquelle déclenche un processus de réchauffement puis de déglaciation qui touche davantage les hautes latitudes. Les rouages d'un basculement climatique se mettent alors en place. L'océan austral connaît une importante remontée des eaux profondes chargées en gaz carbonique, gaz qui se libère dans l'atmosphère. L'effet de serre va prendre alors le relais du moteur principal du réchauffement et la température moyenne du globe grimpe de 4°C en 10 000 ans. Les deux tiers des glaces continentales fondent et le niveau marin s'élève d'environ 130 mètres. L'analyse des bulles d'air incluses dans la glace, atteste que leur CO<sub>2</sub> est anormalement appauvri en carbone 14 indiquant qu'il s'agit bien d'une libération de gaz carbonique longtemps emprisonné dans les fonds marins (10, 11).

De son côté le français Claude Lorius, membre de l'expédition qui entreprit le célèbre carottage à plus de 3 500 mètres de profondeur à la station russe de Vostok dans les glaces de l'Antarctique, remontera le profil climatique de notre planète jusqu'à 400 000 ans (12). Avec le projet EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*), le forage du Dôme C permet d'atteindre 800 000 ans en arrière. Ce dernier chantier mobilisera plusieurs laboratoires dont celui de glaciologie et géophysique de l'environnement (LGGE) associé à l'université de Grenoble, et celui des sciences du climat et de l'environnement (LSCE) associé à l'université de Versailles-

Saint-Quentin-en-Yvelines. L'analyse très fine de toutes ces carottes arctiques et antarctiques se poursuit sur une échelle de temps très courte, de quelques dizaines d'années seulement, afin de percer les mécanismes biogéochimiques qui régissent le climat de la Terre, et ainsi mieux cerner le réchauffement actuel lié aux activités humaines.

## **Données climatiques et altimétriques**

Il va sans dire que la collecte de mesures fiables est une condition indispensable à toute tentative d'interprétation de l'évolution du climat. Ceci est particulièrement vrai pour les deux paramètres majeurs de température moyenne de la planète et de variation du niveau des océans.

### **Evolution de la température moyenne du globe**

La coopération internationale entre les services météorologiques s'est structurée avec la création en 1950 de l'Organisation météorologique mondiale (OMM). Aujourd'hui l'OMM regroupe 191 états, et récolte en temps réel les informations standardisées fournies par 9 satellites, 3000 avions, 11 000 stations d'observation terrestre, 1 300 ballons sondes lâchés chaque jour, 4 000 bateaux en mer, 1 200 balises flottantes. A partir de 2003 plus de 3 000 stations nouvelles ont été ajoutées pour obtenir une meilleure couverture du globe.

Concernant la température moyenne de la Terre, indicateur surveillé de près depuis plus de trente ans, sa construction est élaborée à partir des mesures relevées à un mètre au-dessus du sol, ainsi qu'à la surface des océans. Philip Johnes directeur du *Climate research unit* (CRU) de l'université d'East Anglia Royaume Uni, a proposé de retenir un maillage de 5° de longitude par 5° de latitude, définissant ainsi 2592 boîtes sur l'ensemble du globe. Dans chacune d'elles, les données journalières disponibles sont regroupées pour faire une moyenne annuelle. Cette moyenne est alors comparée à la moyenne obtenue sur des périodes espacées de plusieurs années dans cette même boîte<sup>(13)</sup>. Pour l'ensemble de toutes les boîtes, la différence entre les moyennes obtenues sur deux périodes données fournit l'indicateur d'évolution globale de la température.

Cette méthode a fait l'objet de diverses critiques. Par exemple les oscillations de température du Pacifique tropical, la plus vaste étendue liquide de la planète bleue qui totalise à elle seule un quart de la surface du globe, peuvent présenter des écarts de températures très loin de leur moyenne en période de Niño : jusqu'à + 5°C ou 6°C. Ce qui conduirait à un biais de température moyenne de la planète. D'autres critiques concernant l'emprise de l'urbanisation qui majorerait le recueil des données thermiques, ainsi que le traitement mathématique de ces données, se sont exprimées<sup>(14, 15)</sup>. Néanmoins comme on le verra plus loin c'est bien cet indicateur qui sera utilisé par les experts pour la définition des objectifs de prévention à l'échelle des continents.

### **Elévation du niveau marin**

En ce qui concerne l'évolution du niveau de la mer, la marégraphie était jusqu'à un passé récent la seule technique disponible. Elle présentait l'inconvénient de ne mesurer que la variation relative du niveau de la mer par rapport à la côte (les mouvements verticaux de la croûte terrestre devant être pris en compte) et de

restreindre les mesures aux bordures continentales et aux îles. Le développement dans les années 1970-1980 des systèmes d'orbitographie et de positionnement, ainsi que d'altimétrie spatiale, ont conduit à l'émergence d'une nouvelle science : l'Océanographie Spatiale globale de haute précision. Ce sont les télémesures du satellite Topex/Poseidon lancé en 1992 par une fusée Ariane 4 qui donnèrent accès à des données altimétriques absolues sur l'ensemble des océans. Placé sur orbite à 1336 km et faisant le tour de la terre en 117 minutes il a fonctionné jusqu'en 2005 et totalisé 60 000 révolutions autour de la terre, à raison de 50 000 mesures quotidiennes. La précision est de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres et la couverture du domaine océanique est complète.

La conséquence fut le développement de l'océanographie opérationnelle suite à la synergie étroite impulsée entre recherche fondamentale, hautes technologies et demande socio-économique. L'impulsion fut donnée grâce à la coopération exemplaire menée à Toulouse entre le Centre national d'études spatiales (CNES) et le Groupement de Recherche en Géodésie Spatiale (GRGS), puis ensuite avec le Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiale (LEGOS) ainsi que la société civile Mercator Océan. Les satellites Jason 1 et Jason 2 ont pris le relais de Topex Poséidon, relevant en continu les courants marins de surface et leurs variations sous l'effet des marées, des saisons, et du réchauffement climatique. Les satellites sont capables de fournir des cartes altimétriques chaque 10 jours. Il est prévu que le satellite Jason 3 prenne le relai de Jason2 en janvier 2016 et qu'ultérieurement l'Agence spatiale européenne lance le projet Sentinel-6.

Les données satellitaires collectées jusqu'ici montrent que le niveau marin du globe a gagné 8 cm (en moyenne géographique) entre 1992 à 2015. Les équipes internationales du CNES et de la NASA, anticipent pour 2100 une hausse probable de 90 cm.

## Modélisation climatique planétaire

Dans les années 1980, le géologue Gérard Bond de l'université de Columbia imagine une méthode d'étude des sédiments qu'il expérimente sur les décharges de la calotte glaciaire des Laurentides dans l'Atlantique Nord. Il met en évidence des petits cycles de 1 470 ans de variation de la température et du niveau de la mer qu'il relie à des modifications de l'activité solaire<sup>(16)</sup>.

Plus récemment les chercheurs se sont aperçus que les récifs coralliens mémorisent assez finement les variations de température et du niveau de la mer, dans l'exosquelette de certains foraminifères fossiles, au point que ces derniers jouent le rôle de véritables archives climatiques. Ainsi l'équipe pluridisciplinaire de l'unité mixte du CEREGE (Centre européen de recherche et d'enseignement des géosciences de l'environnement), sous tutelle de l'Université d'Aix-Marseille, et à laquelle sont associés le CNRS et l'IRD en partenariat avec le Collège de France, a développé des techniques analytiques novatrices qui couvrent les disciplines de la géochimie organique, inorganique et isotopique, ainsi que de la géochronologie isotopique.

L'importante masse de données ainsi recueillies ouvre la voie à des modélisations faisant intervenir des paramètres de "*forçages externes*", à différentes échelles de temps (paramètres astrophysiques, taches solaires, émissions volcaniques, ou gaz à effets de serre) générateurs "*de rétroactions internes*" (telles que la circu-

lation océanique, la composition chimique dans l'atmosphère). Ces modélisations contribuent à expliciter le processus des changements de climat à l'échelle globale, comme par exemple au cours du quaternaire récent, et faire avancer les connaissances sur les changements climatiques présents et futurs. La démarche a été présentée lors d'un colloque qui s'est tenu au Collège de France le 9 novembre 2015 (17), et figure dans le rapport scientifique annexé au document de la 21<sup>e</sup> conférence de la convention-cadre des Nations-Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) qui s'est tenue à Paris-Le Bourget du 30 novembre au 12 décembre 2015 sous le nom de COP 21.

Dans le sillage des illustres explorateurs que furent Jean-Baptiste Charcot ou Paul-Emile Victor, la recherche française, on le voit, poursuit activement la collecte d'un ensemble de données toujours plus pointues, tant dans les glaces polaires que sur les îles coralliennes des mers chaudes. Développer des modèles pertinents nécessite le traitement d'une grande quantité de paramètres, et l'utilisation de supercalculateurs. La climatologie est une science jeune apparue avec les ordinateurs et le développement de l'informatique. Pas moins d'une quarantaine de modèles ont été créés dans différents laboratoires du monde, chacun produisant une variabilité interne aux sollicitations d'origine naturelle ou anthropique. Mais l'immense complexité de ces modèles invite à la modestie en raison des difficultés à quantifier et articuler la circulation atmosphérique et océanique, la rétroaction sur les nuages, l'évolution des teneurs de l'atmosphère en vapeur d'eau et gaz à effet de serre. Il faudra densifier les réseaux d'observation sur des marqueurs hydrogéologiques spécifiques tels que micro-atolls, îles coralliennes, sédiments côtiers, et cela aux moyennes comme aux hautes latitudes.

### **Effet de serre et horizon 2100**

L'idée que l'activité de l'homme puisse agir sur le climat, remonte à une communication du suédois Svante Arrhénius parue en 1869. Il estimait que doubler la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère augmenterait la température de 5°C en même temps que la teneur en vapeur d'eau, par effet de serre (18). Toutefois le terme "changement climatique" qui fait référence à une modification durable du climat global de la Terre sous l'influence de l'homme, attendra les années 1980 pour voir le jour. A l'aube du XXI<sup>e</sup> siècle, le "changement climatique" d'origine humaine va subitement poser un dilemme sociétal à l'échelle planétaire.

La concentration de CO<sub>2</sub> avant l'ère industrielle était de 278 ppm, en 2014 elle est passée à 400 ppm. Depuis le début de l'ère industrielle, on estime à 2000 gigatonnes la quantité de CO<sub>2</sub> émise par l'activité humaine. L'échauffement naturel du sol et des océans envoie de la chaleur sous forme de rayonnement infra-rouge thermique lequel est piégé par un couvercle gazeux composé de vapeur d'eau élément responsable à 60% de l'effet de serre de notre globe, de CO<sub>2</sub> qui l'est à hauteur de 26%, d'ozone à 8%, et de divers autres gaz où figurent le méthane, le protoxyde d'azote agissant pour 6%. Il faut noter au passage que la vapeur d'eau et le CO<sub>2</sub> absorbent de façon complémentaire dans des domaines de fréquences différents. Si l'on admet que la température moyenne du globe est de +15°C, chaque mètre carré de la surface de la terre rayonne 390 watts, et c'est cette dernière grandeur d'énergie qui fonde le mécanisme climatique plutôt que la température qui n'est elle qu'un indicateur.

Quant aux perspectives 2100, l'accord adopté par les 195 pays au sommet de la COP 21 de Paris-Le Bourget est un signal fort pour dire que le monde est résolument tourné vers un avenir "bas carbone". Il s'agit d'une première étape en vue d'un accord mondial pour affronter ce défi. La deuxième partie du 5<sup>e</sup> Rapport de synthèse à l'intention des décideurs, élaborée par le Groupe d'experts intergouvernementaux sur le climat (GIEC), stipule que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre ont de larges répercussions sur les systèmes humains et naturels. Depuis le début de l'ère industrielle elles seraient déjà responsables de l'augmentation de 0,9°C de la température moyenne du globe. L'atmosphère et les océans se réchauffent, la couverture de neige et de glace diminue, le niveau de la mer s'élève (19).

Sous la pression des pays les plus vulnérables, la barre des 1,5 °C à ne pas dépasser pour 2050 a été officiellement inscrite dans les objectifs de la COP21. C'est un symbole important même si les spécialistes du climat s'accordent à dire que son franchissement est inéluctable. Pour le moment, les réductions d'émissions promises de façon volontaire par 186 Etats conduisent à un total de 55 gigatonnes de CO<sub>2</sub> rejetée en 2030 alors qu'il faudrait atteindre 40 gigatonnes pour rester sous les 2°C. Les experts auront à déterminer d'ici 2018 quel niveau d'émissions serait compatible avec un réchauffement limité à 1,5°C et feront à ce moment un bilan des efforts collectifs atteints. Les pays seront sans nul doute appelés à revoir leurs ambitions à la hausse, sur la base du volontariat, avant le nouvel inventaire prévu pour 2023. Concernant ces objectifs, les réserves émises ne manquent pas et certains physiciens se sont interrogés : pourquoi faire un tel procès à "l'innocent carbone" (20) ?

En attendant le Bureau des Nations-Unies pour la réduction des risques de catastrophes (Unisdr) se mobilise. Sa directrice Margareta Wahlström convoque un important sommet à Genève fin janvier 2016, rappelant qu'au cours de la dernière décennie on a eu à déplorer 700 000 morts, 1,4 million de blessés, 23 millions de sans abri et 1,3 milliard de dégâts matériels relevant majoritairement de causes climatiques. Une hécatombe en augmentation de 20 % par rapport à la décennie précédente. L'objectif auquel s'est attelé l'UNISDR est de passer d'une culture de réaction à une culture de prévention, car développer la résilience est moins coûteux, plus humain et contribue davantage à réduire la misère et les risques de guerre.

## Le cas particulier de la Méditerranée

Le plus grand exemple connu d'inondation sur la planète est intervenu il y a 5,2 millions d'années, lorsque l'Atlantique a ouvert la brèche du détroit de Gibraltar. Aujourd'hui la Méditerranée est une mer semi-fermée qui évapore beaucoup plus qu'elle ne reçoit, avec un déficit moyen annuel correspondant à une lame d'eau de 70 cm par an.

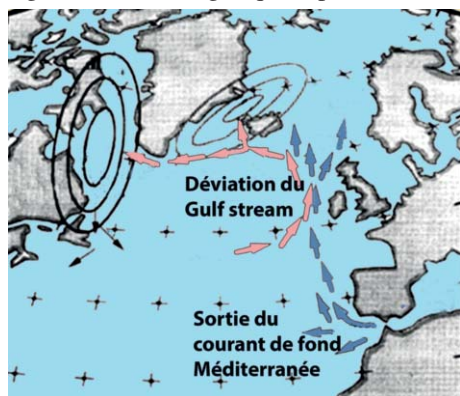
L'équilibre général du niveau marin se fait par le détroit de Gibraltar et accessoirement par le canal de Suez. L'eau salée résultant de l'évaporation s'accumule dans les profondeurs et ressort par un courant de fond traversant le détroit de Gibraltar d'Est en Ouest à raison de 800 000 m<sup>3</sup>/s. En sens inverse un autre courant de surface équilibre le volume en faisant pénétrer une eau atlantique plus chaude et moins salée qui longe la côte africaine. La topographie marine du seuil de Camarinal (point de passage obligé du courant de fond), génère un transfert d'énergie hydrolienne colossal amplifié par les mouvements des marées. Les vitesses de transit à marée haute peuvent dépasser 2 m/s. L'ISEO (*international sustainable energy*



organisation), institution basée à Genève, s'efforce de faire émerger un vaste projet de parc à énergie renouvelable géo-éo-hydrolienne. Ce projet pourrait devenir le moteur d'une politique de co-développement Nord-Sud et serait un exemple pour le reste de la Méditerranée. En effet la course à l'énergie dans les pays de la rive sud est source d'âpres conflits qui perturbent profondément la vie des sociétés, et constitue l'enjeu majeur des années à venir. Les pays méditerranéens vont voir leur demande d'énergie primaire passer de 12 700 TWh à 17 500 TWh en 2025, cette augmentation provenant majoritairement de la croissance démographique des pays du sud. Il est donc essentiel de diminuer la dépendance aux énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon).

Mais il y a d'autres raisons pour s'intéresser au cas de Gibraltar. Avec l'augmentation de l'évaporation, la puissance des courants de transit s'intensifie, ce qui augmente les risques pour la navigation. Ce carrefour maritime est extrêmement sensible à la moindre différence de température, de surcote et de houle. Or le passage est devenu une des plus grandes routes de navires conteneurisés au monde. Quelques 120 navires y transitent chaque jour dans des conditions de plus en plus périlleuses, les accidents étant occasionnés par des navires anciens de plus de 25 ans. Au cours des cinq dernières années quelque 30 accidents ont été enregistrés, et la lenteur des interventions vient des eaux sans souveraineté officielle ce qui aggrave la situation (21). L'aménagement d'un rail maritime pour prévenir des accidents de pollution majeure se fait de plus en plus pressant.

Sur un plan plus général le déficit d'apport d'eau douce à la Méditerranée ne pourra à l'avenir que s'amplifier, les décharges fluviales en rive Sud devenant négligeables en raison des captages pour les besoins humains. L'augmentation de la salinité va donc intensifier le courant profond de sortie en direction de l'Atlantique. Se basant sur des observations antérieures à notre ère, le géophysicien R. Johnson a signalé le réel danger que représenterait l'augmentation des sorties d'eaux salées de



la Méditerranée pour l'équilibre actuel des courants marins. En effet le courant océanique de l'Atlantique Nord, prolongement du Gulf Stream, serait renvoyé vers l'Islande et le Labrador par un courant méditerranéen plus puissant qui remonterait vers la Norvège (Fig. 4). La conséquence serait des chutes de neiges beaucoup plus abondantes en Amérique du Nord une baisse des précipitations sur l'Europe où des hivers plus froids et plus secs alterneraient avec de longues canicules estivales (22).

Fig. 4 Impact de la sortie des eaux profondes méditerranéennes (Johnson 1997)

Le remède préconisé serait la construction d'un barrage à Gibraltar comportant un seuil déversoir pour faire entrer les eaux atlantiques de surface côté Nord et un pertuis Sud de sortie des eaux froides et salées (Fig. 5). L'ouvrage longerait le passage le moins profond du détroit, sa hauteur immergée serait deux fois celle de la Grande Pyramide d'Égypte. Avec un angle d'assise de  $30^\circ$  il aurait une largeur de 70 m à son sommet et occuperait un volume de  $1,27 \text{ km}^3$  soit 420 fois le

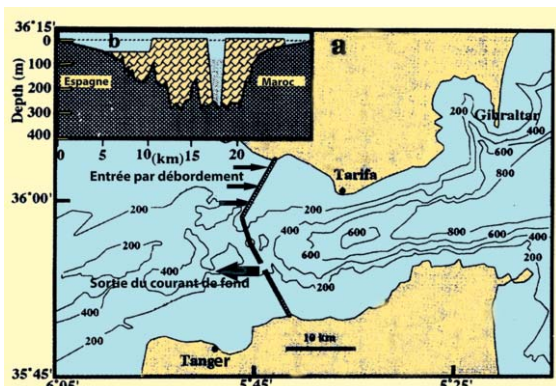


Fig. 5 Projet de barrage  
proposé par R. Johnson (1997)

volume de la Grande Pyramide. Le pertuis aurait une largeur maximale de 1 km. Outre son coût, la réalisation de l'ouvrage rencontrerait de nombreuses difficultés d'ordre technique, environnemental et politique. Sans relation avec ce projet, une étude de modélisation des courants qui traversent le détroit de Gibraltar, et conduite par Ha Phong en 2014, suggère que rétrécir le passage à seulement 1 km de large réduirait l'équilibre des

échanges entre pertes par évaporation et entrées d'eaux atlantiques, permettant ainsi d'isoler la Méditerranée de l'élévation généralisée du niveau des Océans (23).

Le projet de barrage avancé par l'ISEO serait quant à lui un ouvrage fermé, équipé de passes à poissons et d'un canal de navigation dont les écluses hébergeraient des turbines hydroliennes et marémotrices. Il ferait office de rail de sécurité.

## Conclusion

La climatologie est une science jeune, confrontée à des phénomènes très complexes vis à vis desquels elle se trouve encore insuffisamment aboutie pour s'engager dans des prédictions fiables. Mais elle dispose d'une masse de données de plus en plus fines couvrant l'ensemble de la surface du globe. L'enjeu est de mettre au point des grilles de calcul capables de résoudre le problème de flux de mesures toujours croissants, pour une optimisation mathématique de ces données massives en vue de la modélisation et de la prise de décision.

Sans verser dans le travers du compte à rebours d'une menace d'apocalypse, les instances internationales quant à elles s'interrogent sur la vulnérabilité des populations face au changement climatique et sur leur capacité d'adaptation et de résilience. Ce questionnement a fait émerger la notion de responsabilité engageant tous les états du monde face à la menace climatique, sachant que cette menace représente près de 90% du coût humain en catastrophes naturelles.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) Cutterand, S, et S, Jouty. 2012. Glaciers, mémoire de la planète Editions Hêbeke Paris Book Partners Ltd 218 pp
- (2) Mourgue de Montredon J.A. 1783. Recherches sur l'origine et sur la nature des vapeurs qui ont régné dans l'atmosphère pendant l'été de 1783 in Histoire et mémoires de l'Académie Royale des Sciences - Extrait des registres de la Société Royale des Sciences de Montpellier daté du 7 août 1783 1781 :1784  
BNF/Gallica : <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k35800.image.f888>

- (3) Martin P. 2015. Les évènements de l'année 1763 en Beaujolais, Bourgogne et Europe : l'explosion du Laki, volcan islandais. *Généalogie et Histoire* N° 162/163 pp 60-64
- (4) Géli H., et J.F.Soussama. 2015. Le changement climatique, ce qui va changer dans mon quotidien. 163 pp Edt. Quae Cirad Ifremer, Inra, Irstea
- (5) Croll, J. 1875. *Climate and time in their geological relations*
- (6) Milankovitch, M. 1920. *Théorie mathématique des phénomènes thermiques produits par la radiation solaire* Gauthiers-Villar Paris
- (7) Dansgaard W, et al. 1989. The abrupt termination of the younger Dryas climate event. *Nature*, 339, 532-534
- (8) Bard E. 2013. Climate change, the physical science basis. Contribution to the fifth assessment of the intergovernmental panel on climate change, Working group I 2014 pp
- (9) Shakun J.D., P.U. Clark, S.A. Marcott, A.C. Mix, Zengyu Lin, B. Ottebliesner, A.Schmitter and E. Bard. 2012. Global warming preceded by increasing carbon dioxide concentrations during the the last deglaciation. *Nature* 484 49-54
- (10) Shakun et al <https://www2.bc.edu/jeremy-shakun/publications.html>
- (11) Bard E. [https://www.college-de-france.fr/.../UPL1026748074527999487\\_Bard1](https://www.college-de-france.fr/.../UPL1026748074527999487_Bard1).
- (12) Lorius, C, et L, Carpentier. 2011. *Voyage dans l'anthropocène. Cette nouvelle ère dont nous sommes devenus les héros.* Editions Actes Sud
- (13) Jouzel J. et A. Debrosse. 2014. *Le défi climatique objectif 2°C* 250 pp Dunod
- (14) Courtillot V. 2009. *Nouveau voyage au centre de la terre* Odile Jacob
- (15.) Rittaud B. 2010 *Le mythe climatique Science ouverte* Seuil
- (16) Bond, G.; et al. (2001). "Persistent Solar Influence on North Atlantic Climate During the Holocene". *Science* **294** (5549): 2130–6
- (17) Bard E. 2015. Climat énergie et société, le Collège de France et la COP 21 exposé présenté au Colloque organisé par E. Bard le 9 novembre 2015
- (18) Arrhenius S. A. 1896. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground", *Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 5, n° 41, avril 1896, p. 237-276
- (19) Giec-Onerc [www.developpementdurable.gouv.fr/.../ONERC\\_Resume\\_decideurs\\_vo](http://www.developpementdurable.gouv.fr/.../ONERC_Resume_decideurs_vo)
- (20) Gervais F. 2013 *L'innocence du carbone, l'effet de serre remis en question* Albin Michel
- (21) MAREÏ N. 2009. Le détroit de Gibraltar fenêtre sur le monde pour l'Espagne. In *Historiens et Geographes* n° 408. Numéro spécial, L'Espagne, les métamorphoses d'une puissance économique sous la coord. scientifique de N. Baron Yellès, pp 121-130.
- (22) Johnson R.G. 1997. Climate control requires a dam at the strait of Gibraltar. *Eos American journal of geophysical union*. Vol 78 N° 27 pp 277-284
- (23) Ha-Phong Nguyen 2014. Numerical modelling of the strait of Gibraltar for the purpose of a project to stabilize the level of Mediterranean Sea from the globally rising ocean levels Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne PhD Thesis 149 p.