

# ANNUAIRE du **COLLÈGE DE FRANCE** 2018 - 2019

Résumé des cours et travaux

119<sup>e</sup>  
année



COLLÈGE  
DE FRANCE  
—1530—

# ÉVOLUTION DU CLIMAT ET DE L'OcéAN

Édouard BARD

Membre de l'Institut (Académie des sciences),  
professeur au Collège de France

---

Mots-clés : climat, océan, mousson, civilisation maya, Empire romain, civilisation de l'Indus, civilisation chinoise, empire d'Akkad

---

Le colloque « Le cycle de l'eau et le climat » est disponible en vidéo sur le site internet du Collège de France (<http://www.college-de-france.fr/site/edouard-bard/symposium-2018-2019.htm>).

## ENSEIGNEMENT

### COURS – CLIMATS EXTRÊMES ET ANALOGUES ACTUELS : DES DERNIERS MILLÉNAIRES À L'OPTIMUM HOLOCÈNE

Il faut replacer le réchauffement du dernier siècle dans un contexte temporel plus large afin d'en déterminer la singularité et de distinguer les causes sous-jacentes, naturelles et anthropiques. Les variations climatiques des derniers millénaires peuvent servir à tester de multiples hypothèses avec une fiabilité des enregistrements généralement suffisante.

Pour ces périodes reculées, les connexions entre les populations humaines étaient relativement limitées en comparaison avec notre société mondialisée. Il est donc *a priori* plus facile d'identifier l'impact des changements climatiques régionaux sur les sociétés anciennes. Ces leçons de l'histoire et de la préhistoire peuvent aussi nous éclairer dans nos choix et réactions face au changement climatique actuel et à ses expressions régionales souvent amplifiées par rapport à la tendance, à l'échelle mondiale.

## Cours 1 – Impact des variations climatiques sur la civilisation maya

La civilisation maya s'est développée sur un large espace de la Mésoamérique, allant des régions boisées du Peten et du Chiapas aux basses terres de la péninsule du Yucatan. Sur tout le pays maya, les précipitations suivent un cycle saisonnier marqué, humide en été et sec en hiver, causé par la migration en latitude de la zone de convergence intertropicale (ZCIT). Néanmoins, l'accès à l'eau douce est souvent difficile aussi bien dans les zones élevées de la jungle tropicale qu'au niveau du plateau karstique du Yucatan. Cette région se caractérise par une absence de fleuve de surface, compensée par un réseau de puits naturels interconnectés (les cénotes).

La civilisation maya a duré plus de quatre millénaires, avec une période d'apogée au I<sup>er</sup> millénaire de notre ère, caractérisée par l'émergence de nombreuses cités-états en compétition les unes avec les autres. L'utilisation récente du lidar aéroporté a révolutionné l'étude des sites mayas en permettant de cartographier des zones inaccessibles sous la forêt tropicale. Ces recherches archéologiques récentes ont mis en évidence un paysage modifié à grande échelle par l'agriculture intensive destinée à nourrir une importante population, dont les estimations ont été révisées à la hausse (environ 10 millions).

La période du Classique terminal s'est terminée de façon relativement abrupte entre 800 et 900 AD. Après leurs phases d'apogée respectives, les principales cités ont été abandonnées à la suite d'événements sociaux et politiques complexes (e.g. Copan, Caracol, Tikal, Calakmul, et Coba en allant du sud au nord). Les dates de construction des monuments et des conflits guerriers sont connues grâce aux calendriers et aux hiéroglyphes mayas. Les données épigraphiques ont pu être compilées sous la forme d'indices statistiques de guerres intercités permettant de synthétiser les soubresauts de la civilisation maya à la période classique.

Les textes mayas ne décrivent malheureusement pas les variations climatiques de ces époques, mais il est possible de les reconstituer à partir d'archives naturelles à haute résolution temporelle comme les sédiments lacustres laminés, les stalagmites des grottes, les cernes d'arbres ou les anneaux de croissance des coraux massifs. En particulier, il a été possible de mesurer le rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  des stalagmites (e.g. grotte de Yok Balum au Belize), des microfossiles calcaires (ostracodes, gastéropodes), ainsi que des rapports  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  et/ou D/H des cristaux de gypse et de biomarqueurs moléculaires contenus dans les sédiments lacustres (lac de Chichancanab au Yucatan, lac de Salpeten au Peten).

Ces séries bien datées, notamment par la méthode U-Th pour les stalagmites, permettent de retracer les variations des précipitations au cours des derniers millénaires : les périodes humides correspondent aux phases d'expansion de la civilisation maya, tandis que des sécheresses interrompent ces développements, en particulier à la fin du Classique terminal. Cependant, la comparaison des différents enregistrements paléoclimatiques montre une grande variabilité, probablement liée à des réponses locales différentes ou aux imperfections des indicateurs. Néanmoins, les épisodes climatiques les plus importants se retrouvent dans plusieurs enregistrements jusqu'à des zones situées au-delà du pays maya (séries dendroclimatiques du Mexique, coraux massifs de Bonaire, sédiments marins au large du Venezuela), ce qui serait compatible avec des variations régionales affectant la ZCIT.

L'importance du forçage climatique semble donc indéniable pour expliquer, au moins en partie, les crises sociétales qui ont entraîné l'effondrement des cités mayas à la fin du I<sup>er</sup> millénaire, comme le suggèrent les correspondances entre les

indicateurs paléoclimatiques et les indices statistiques des conflits guerriers mentionnés par les textes mayas.

## **Cours 2 – Optimum climatique romain et détérioration de l'Antiquité tardive**

Durant plus d'un millénaire, l'histoire de l'Empire romain est complexe et émaillée d'événements politiques et militaires qui ont frappé les esprits. Une période d'expansion territoriale jusqu'en 200 AD est suivie d'une phase de dégradation marquée vers 400 AD par la division de l'empire en deux parties, suivie de nombreux conflits armés entraînant des pertes territoriales, notamment après l'abdication du dernier empereur romain d'Occident (476 AD)

Les historiens débattent encore des multiples causes de l'effondrement d'un empire qui aurait été décadent moralement et financièrement : invasions barbares, divisions sociales, guerres civiles, discordes religieuses et montée du christianisme, grandes épidémies de peste, crise budgétaire liée aux coûts militaires d'une expansion nécessaire pour fournir l'empire en biens, nourriture et esclaves. À cela, on doit ajouter les contraintes environnementales très souvent oubliées. En effet, des recherches récentes montrent l'importance des variations climatiques qui ont favorisé l'apogée, puis participé à la chute de la civilisation romaine.

Même si quelques scientifiques de l'Antiquité ont posé les premiers jalons pour estimer les températures (thermoscopes de Philon de Byzance et de Héron d'Alexandrie), il n'existe pas d'enregistrements instrumentaux des variations météorologiques pour l'époque romaine. Néanmoins, les textes antiques contiennent de nombreuses mentions d'événements liés au climat : grandes chaleurs, froids intenses, pluies et sécheresses extrêmes, famines... Pour la partie orientale de l'Empire, il faut ajouter les enregistrements des crues du Nil, cruciales pour favoriser l'agriculture de l'Égypte, grenier à blé de l'Empire romain depuis son annexion (30 BC). Les statistiques des événements météorologiques mentionnés par les textes romains suggèrent que le climat était favorable jusqu'à 200-300 AD environ et que cette période optimale a été suivie de dégradations avec des impacts humains indéniables (e.g. famines).

Pour reconstituer les variations climatiques de l'époque romaine, il faut aussi considérer les archives naturelles comme les sédiments lacustres, les anneaux d'arbres, les stalagmites, ainsi que les glaces du Groenland et des glaciers alpins. Ces derniers ont fait l'objet de nombreuses recherches qui ont permis de mettre en évidence des avancées et des retraits généralisés, dont un correspond justement à l'optimum climatique romain (environ 200 BC à 200 AD). Cette régression des glaciers est accompagnée d'un climat relativement humide comme l'indiquent plusieurs enregistrements (sédiments lacustres, stalagmites et anneaux d'arbres). Après 250 AD, on assiste à une dégradation climatique qui culmine vers 500-600 AD, période que certains auteurs appellent le Petit Âge glaciaire de l'Antiquité tardive (LALIA en anglais). La phase la plus froide correspond à des éruptions volcaniques d'ampleur mondiale dont les signatures géochimiques se retrouvent dans les glaces polaires.

Ce changement climatique affecte une zone géographique relativement large avec de multiples évidences dans l'hémisphère nord. Par ailleurs, les séries dendroclimatiques suggèrent une correspondance nette entre la variabilité climatique au nord de l'Italie et celle de l'Asie centrale. Des simulations numériques réalisées

avec des modèles climatiques permettent d'identifier les mécanismes de dynamique atmosphérique responsables de la corrélation spatiale des températures pour les deux régions.

Même s'il faut éviter tout déterminisme simplificateur, il apparaît clairement que les dégradations climatiques à partir de 200-300 AD sont accompagnées de troubles sociétaux de l'Empire romain, notamment les conflits liés aux mouvements migratoires des Huns et des peuples germaniques ou slaves. Par ailleurs, une grande épidémie de peste débute en 541 AD et sera suivie d'une quinzaine d'autres résurgences de la maladie jusqu'en 767 AD. Cette pandémie (dite « Peste de Justinien ») a durement frappé l'Empire romain d'Orient, empêchant toute possibilité de reconquête et de rétablissement de l'unité de l'Empire. Des recherches récentes montrent que la contamination par la peste est modulée par le climat en Asie centrale qui affecte les populations de grandes gerbilles et de puces, vecteurs de la bactérie *Yersinia pestis*. Même s'il est encore impossible de quantifier ce rôle, il apparaît clairement que le changement climatique à la fin de l'Empire romain a eu de multiples répercussions indirectes, allant bien au-delà des simples effets sur l'agriculture et l'approvisionnement en nourriture des populations.

### **Cours 3 – Variabilité de la mousson et ses impacts sur la civilisation chinoise**

Le climat de la Chine est dominé par le phénomène de la mousson, caractérisé par une saisonnalité marquée des vents et des pluies. Pendant l'été, des masses d'air humide en provenance de l'océan Indien et de l'est du Pacifique engendrent d'intenses précipitations sur le sud et l'est du pays. Depuis ses débuts, il y a environ 6 000 ans, l'agriculture chinoise suit la répartition géographique des températures et des pluies. La mousson a notamment permis l'invention et le développement de la riziculture irriguée, nécessaire pour nourrir une importante population.

L'histoire de la Chine commence vers 1500 BC avec l'apparition de l'écriture, qui permet de retracer la succession de royaumes et de dynasties qui se sont partagés le territoire chinois et tibétain. Les transitions dynastiques correspondent à des conflits guerriers et à des vicissitudes sociales, mentionnés dans de nombreux textes chinois. Des études paléographiques et philologiques récentes ont permis de calculer des indices de prospérité, tenant compte notamment de l'abondance des récoltes, ainsi que des indices de troubles sociaux marqués par les révoltes et les guerres et ponctués par les changements dynastiques.

Ces indicateurs historiques peuvent être comparés aux enregistrements d'un traceur de l'intensité de la mousson d'été (rapport  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  mesuré dans les stalagmites de nombreuses grottes chinoises). Ces séries paléoclimatiques, bien datées par la méthode U-Th, montrent des fluctuations au cours des derniers millénaires, avec des épisodes correspondant au Petit Âge glaciaire, à l'optimum médiéval, au Petit Âge glaciaire de l'Antiquité tardive et à l'optimum climatique romain. Des baisses abruptes de l'intensité de la mousson correspondent aussi aux transitions dynastiques et aux conflits guerriers. Les variations du  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  des stalagmites chinois ont pu être confirmées par d'autres séries paléoclimatiques basées sur des carottes de glace prélevées dans les glaciers du Tibet, et des sédiments lacustres permettant de remonter jusqu'à plus de 2000 BC (Huguang Maar).

Des recherches récentes ont permis d'étudier les relations avec la variabilité climatique en périphérie de la Chine. Pour le dernier millénaire, on observe de nettes

correspondances avec les séries  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  de stalagmites de l'est de l'Inde et les séries dendroclimatiques de la péninsule indochinoise. Des épisodes de sécheresse seraient à l'origine de l'effondrement de la cité « hydraulique » d'Angkor du royaume Khmer (Cambodge actuel). Par contre, un climat plus humide dans les zones désertiques de l'Asie centrale pendant le Petit Âge glaciaire aurait favorisé l'essor de l'Empire mongol et entraîné l'invasion de la Chine conduisant à la dynastie Yuan.

Pour identifier les causes de ces changements climatiques, les séries climatiques chinoises ont été comparées avec les variations des forçages externes (Soleil et volcans), ainsi que celles qui ont été observées pour l'oscillation El Nino/La Nina originaire du Pacifique. La prise en compte et la simulation explicite de ces phénomènes par des modèles climatiques a permis de confirmer l'importance de l'ENSO et des forçages volcaniques et solaire pour expliquer les épisodes de sécheresse et les gradients de précipitations sur le continent asiatique.

#### **Cours 4 – L'événement à 4.2 k BP et ses impacts sur la civilisation de l'Indus**

Les enregistrements paléoclimatiques de la mousson asiatique montrent une lente diminution durant toute la période de l'Holocène, à laquelle se superposent des baisses abruptes et transitoires, ayant duré quelques siècles. Pour l'événement centré vers 2200 BC (dit « de 4.2 k BP »), il est possible de discerner un impact géographique à l'échelle mondiale, avec une baisse des précipitations pour les latitudes intertropicales et subtropicales et des augmentations plus hautes en latitude.

L'impact de l'événement du 4.2 k a pu être étudié pour la zone du Pakistan, où s'est développée la civilisation harappéenne entre 2600 et 1900 BC. Son vaste territoire s'étendait autour du fleuve Indus et de ses affluents, ainsi que sur la côte de la mer d'Arabie, de la frontière actuelle entre le Pakistan et l'Iran jusqu'au Gujarat indien.

Cette région est en limite de la zone d'influence de la mousson d'été, avec des précipitations concentrées dans le nord du pays, en amont de l'Indus, sur les contreforts de la chaîne himalayenne. En hiver, la région reçoit aussi des pluies plus faibles en provenance de l'ouest. La civilisation de l'âge du bronze fondée sur l'agriculture et l'élevage était donc très tributaire de la ressource en eau. Les grands centres urbains harappéens se caractérisent en effet par une architecture hydraulique élaborée avec des systèmes de bains et de canalisations (*e.g.* Mohenjo-daro, Dholavira, Lothal), ainsi que de grands réservoirs parfois reliés aux fleuves (*e.g.* Lothal). De nombreux sites archéologiques sont concentrés le long du fleuve endoréique Ghaggar-Hakra, au nord du désert de Thar, qui était à l'époque un affluent de l'Indus.

La civilisation harappéenne possédait une écriture qui n'est pas encore déchiffrée, en raison de la rareté et de la brièveté des textes essentiellement limités à quelques inscriptions sur des sceaux. Les archéologues débattent encore des raisons de l'émergence, de la prospérité et du déclin rapide de cette brillante civilisation. En l'absence de texte, il est utile de se tourner vers les archives paléoenvironnementales, comme les sédiments lacustres et marins et les stalagmites.

Au nord du désert de Thar, des lacs aujourd'hui asséchés étaient en eau à l'époque de l'apogée de la civilisation de l'Indus (*e.g.* paléolacs Karsandi et Kotla Dahar). Les analyses des rapports  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  et D/H de l'eau structurale des cristaux de gypses préservés dans leurs sédiments permettent de préciser les conditions humides de l'époque et de les comparer aux séries isotopiques de stalagmites provenant du nord-ouest de l'Inde (*e.g.* grotte de Sahiya).

Les sédiments marins prélevés au large du delta de l'Indus ont enregistré les apports fluviaux et éoliens, et nous donnent une perspective temporelle encore plus large. L'analyse pollinique confirme la longue tendance à l'assèchement depuis 3000 BC, avec une baisse des précipitations particulièrement marquée entre 2500 BC et 1500 BC. Il est aussi possible de distinguer les apports en pollens montagnards transportés par le fleuve depuis l'Himalaya des apports en pollens des steppes arides du Balouchistan transportés par les vents de la mousson d'hiver. D'autres analyses isotopiques, géochimiques et micropaléontologiques des sédiments marins permettent d'étudier les influences combinées des moussons d'été et d'hiver. Les signaux semblent indiquer une baisse de la mousson d'été entre 2200 BC et 1900 BC, et une augmentation relative de l'influence de la mousson d'hiver.

Ces grandes variations hydrologiques régionales ont certainement eu des impacts déterminants pour expliquer le développement et l'effondrement de la civilisation harappéenne. Les données archéologiques elles-mêmes apportent la preuve de l'influence climatique. Dans la région du Ghaggar-Hakra, les centres urbains répartis le long du fleuve ont été abandonnés après 2000 BC, mais la population des sites ruraux a migré vers le nord de l'Inde pour bénéficier d'apports en eau permettant leur survie.

## **Cours 5 – L'événement à 4.2 k BP et ses impacts en Mésopotamie**

La Mésopotamie est considérée comme le berceau de la civilisation, dont l'écriture cunéiforme remonte à plus de 3 000 ans avant notre ère. Vers 2300 BC, Sargon réunit par la force la haute et la basse Mésopotamie, et fonde l'empire d'Akkad. Cette brillante civilisation échangeait avec d'autres peuples depuis la Méditerranée jusqu'à la vallée de l'Indus. Il n'y a pas de certitude sur la localisation de la capitale d'Akkad, mais plusieurs villes fortifiées ont été fouillées, permettant d'illustrer la prospérité de cette société, et d'étudier son déclin abrupt.

Les archéologues ont mis en évidence un hiatus temporel d'occupation (2200-3900 BC) pour certaines régions de la Mésopotamie, accompagné d'une migration des populations vers des zones refuges plus humides, aux abords du Tigre et de l'Euphrate et de leurs affluents. Les textes relatent aussi des conflits guerriers avec les peuples du Zagros qui ont finalement envahi l'empire d'Akkad vers 2200 BC, conduisant à la dynastie des Gutis.

Les évidences du déclin existent dans les sites archéologiques sous la forme de constructions inachevées et de changements de faciès sédimentaires marquant l'assèchement de l'environnement. Il est aussi possible de reconstituer les variations hydrologiques régionales à partir d'archives variées localisées autour de la Mésopotamie : flux de poussières minérales dans les sédiments marins du golfe d'Oman, augmentation de la salinité de surface en mer Rouge entraînant un changement drastique de la sédimentation profonde au nord de cette mer fermée, enregistrements géochimiques d'une période de sécheresse dans les stalagmites de grottes situées à l'est et à l'ouest de la Mésopotamie.

De vifs débats scientifiques se poursuivent au sujet de la vitesse de l'effondrement de l'empire d'Akkad et de la représentativité des sites étudiés pour reconstituer les paléoenvironnements. Néanmoins, l'événement climatique de 4.2 k a entraîné un assèchement indéniable de la Mésopotamie, qui a forcément affecté ces populations, dont la prospérité reposait sur une agriculture optimisée par une irrigation sophistiquée.

Il n'y a actuellement pas de consensus scientifique sur l'origine de l'événement de 4.2 k. Les enregistrements des forçages externes (insolation et éclairage solaire, activité volcanique, teneurs atmosphériques en gaz à effet de serre) ne montrent pas d'anomalie significative pour cette période. Des simulations de modèles climatiques ont été réalisées pour tout l'Holocène, mais elles ne présentent pas d'anomalie climatique correspondant à l'événement de 4.2 k.

On peut tout de même signaler que ces simulations présentent une variation climatique pour un événement plus récent centré vers 700 ans BC. Dans ce cas, une baisse transitoire de l'éclairage solaire affecte les mers nordiques de l'Atlantique, ce qui entraîne une expansion de la banquise et un déplacement vers le sud de la zone de convection des eaux de surface vers les profondeurs. La conséquence est une diminution de la circulation thermohaline avec des répercussions à l'échelle mondiale. Les précipitations aux basses latitudes et dans la zone de la mousson asiatique étant sensibles aux variations de cette circulation thermohaline, ce type de chaîne causale pourrait expliquer certaines réductions transitoires des précipitations pendant l'Holocène. Il n'en reste pas moins que ces effets devraient être amplifiés par des mécanismes encore mal identifiés et que ces hypothèses ne permettront probablement pas d'expliquer l'événement du 4.2 k au vu de l'état actuel des connaissances sur les forçages climatiques.

#### COLLOQUE – LE CYCLE DE L'EAU ET LE CLIMAT

21 juin 2019

Le réchauffement mondial débuté voici plus d'un siècle s'accompagne de variations du cycle de l'eau. Les changements d'évaporation et de précipitation ont conduit à l'augmentation des contrastes des salinités de surface de l'Océan. Celles-ci fournissent un indicateur global du cycle de l'eau permettant de montrer une évolution cohérente et parallèle à celle des températures.

Néanmoins, l'évolution des précipitations est beaucoup plus contrastée à l'échelle régionale que celle des températures. Les tendances depuis 1950 montrent des zones où les pluies ont augmenté (*e.g.* Europe et Amérique du Nord), alors que d'autres régions sont déficitaires (*e.g.* Sahel, pourtour méditerranéen, Chine). Les simulations des modèles climatiques s'accordent à prévoir pour 2100 une poursuite du réchauffement mondial avec un creusement des contrastes régionaux de précipitations.

Le colloque était destiné à faire le point sur les évolutions hydrologiques récentes en détaillant les méthodes utilisées pour étudier les différentes composantes du cycle de l'eau et en abordant les impacts sur les populations des variations de ressources en eau. Après un rappel sur le cycle de l'eau et les évolutions planétaires récentes, j'ai illustré l'extrême sensibilité des sociétés humaines du passé aux changements hydroclimatiques régionaux.

Françoise Vimeux, chercheuse à l'IRD (HSM et LSCE-IPSL), a montré l'intérêt du suivi des isotopes de l'eau pour mieux comprendre les variations hydrologiques, notamment les relations entre la mousson et la circulation de grande échelle. Marielle Gosset, chercheuse à l'IRD (GET), a continué sur la télédétection de la pluie en zone tropicale, en insistant sur les apports des mesures d'opportunité qui utilisent les réseaux de téléphonie mobile, pour compléter localement les informations par radars et satellites météorologiques.

Le rôle des lacs comme régulateurs et sentinelles climatiques a été décrit par Jean François Crétaux, chercheur au CNES (Legos), à partir des mesures historiques du niveau des lacs, complétées par les données des satellites altimétriques et gravimétriques. Les exemples de la mer d’Aral, de la mer Caspienne et du lac Tchad ont permis d’illustrer la diversité et la complexité des réponses lacustres. Stéphane Calmant, chercheur à l’IRD (Legos), a ensuite focalisé son propos sur les variations du débit des fleuves que l’on peut reconstituer en combinant les données de terrain et de télédétection, comme il l’a montré avec des exemples en Amazonie et en Afrique équatoriale. Il a, en outre, abordé les diminutions systématiques des stocks d’eau dans les grands aquifères que l’on peut quantifier grâce aux satellites gravimétriques.

Les variations du stock d’eau sur les continents ont des origines multiples liées au changement climatique, ainsi qu’aux activités humaines dont les impacts hydrologiques sont directs : pompes et barrages hydrauliques, perturbation des écoulements due à l’urbanisation, la déforestation et les changements d’occupation des sols. Anny Cazenave, chercheuse au CNES (Legos), a fait le bilan de ces contributions en montrant que l’évolution actuelle du niveau marin est compatible avec les flux provenant du continent. Elle a aussi montré que la variabilité à haute fréquence du niveau marin est attribuable aux fortes fluctuations interannuelles des stocks continentaux, notamment celles que l’on observe sous les tropiques, engendrées par l’oscillation El Nino/La Nina. Ce phénomène climatique était le sujet de la présentation par Rodrigo Abarca-del-Río, professeur à l’université de Concepción (Chili), qui a rappelé les enregistrements et les mécanismes sous-jacents de cette oscillation qui couple l’atmosphère et l’océan. Il a ensuite abordé son impact sur le cycle de l’eau et les sociétés humaines pour expliquer certaines grandes crises (*e.g.* famines en Inde au XIX<sup>e</sup> siècle, déclin des Mochicas au Pérou et des Pascuans de l’île de Pâques).

La complexité de la modélisation du cycle de l’eau et des prévisions à long terme a été illustrée par Agnès Ducharne, chercheuse au CNRS (Metis-IPSL), à partir de l’exemple de la prise en compte des eaux souterraines dans les modèles numériques. La difficulté des prévisions réside en particulier dans le fait que les eaux souterraines rétroagissent sur le climat et que leurs déterminants sont multiples (climat régional et exploitation directe pour les activités humaines).

Pour clôturer le colloque, le professeur Ghislain de Marsily (Sorbonne Université/Metis-IPSL) s’est focalisé sur l’impact des changements de la ressource en eau sur les populations humaines. Distinguant les notions d’eau verte et d’eau bleue, il a montré la nécessaire prise en compte de « l’empreinte hydrique » des importations alimentaires d’un pays pour évaluer sa dépendance en eau. Les échanges internationaux représentent un tiers de la production agricole totale et conduisent à des transferts d’eau virtuelle très significatifs entre les différentes régions du monde. À l’échelle de la planète, les pays avec un déficit en eau sont situés dans les zones sèches au point de vue climatique, mais aussi dans des régions bien arrosées mais pauvres, où les investissements technologiques font défaut. Malheureusement, les changements hydrologiques liés au réchauffement mondial devraient exacerber ces contrastes.

Intervenants :

- Édouard Bard (Collège de France/Cerege, Aix-en-Provence) : « Perspective paléoclimatique sur l’importance du cycle de l’eau » ;
- Françoise Vimeux (IRD/HSM/LSCE-IPSL, Saclay) : « Variabilité climatique et dynamique atmosphérique dans les régions tropicales : apport des isotopes stables de l’eau » ;

- Marielle Gosset (IRD/Géoscience Environnement Toulouse) : « Télédétection de la pluie dans l'atmosphère tropicale : apport des mesures d'opportunité » ;
- Jean-François Crétaux (CNES/Legos, Toulouse) : « Suivi des lacs par télédétection » ;
- Anny Cazenave (CNES/Legos, Toulouse) : « Cycle de l'eau continental et son impact sur le niveau des océans » ;
- Stéphane Calmant (IRD/Legos, Toulouse) : « Télédétection des fleuves et grands estuaires » ;
- Rodrigo Abarca-del-Rio (Dept. de Geofísica, université de Concepción, Chili), « Impact d'ENSO sur le cycle de l'eau, aspects historiques » ;
- Agnès Ducharne (CNRS/Metis-IPSL, Paris) : « Cycle hydrologique et climat, relations avec les eaux souterraines » ;
- Ghislain de Marsily (Metis-IPSL/Sorbonne Université, Paris) : « Ressources en eau, changement climatique et impact sur les populations ».

#### COURS À L'EXTÉRIEUR

##### **Université de Sofia et Académie bulgare des sciences, Bulgarie**

- 11 décembre 2018 : « Paleoclimate changes around the Black Sea during the last glacial cycle ».

##### **Institut d'océanologie de l'Académie bulgare des sciences et Université de Médecine de Varna, Bulgarie**

- 13 décembre 2018 : « Deglacial sea level and the reconnection of the Black Sea with the Mediterranean sea ».

##### **Université de Lausanne, Suisse**

- 24 janvier 2019 : « Le climat des derniers millénaires et ses impacts sur l'homme » ;
- 25 janvier 2019 : « Le radiocarbone comme traceur et chronomètre de l'environnement ».

##### **Université de Oulu, Finlande**

- 5 juin 2019 : « The climate of the last millennia and its impacts on humans » ;
- 6 juin 2019 : « Radiocarbon as a tracer and chronometer of the environment ».

#### RECHERCHE

Une partie du travail a porté sur le développement et l'utilisation d'un nouvel indicateur paléothermométrique fondé sur la mesure des tétraéthers hydroxylés préservés dans les sédiments marins (Davitian *et al.*, 2019). L'index RI-OH calculé à partir des concentrations des différents tétraéthers hydroxylés a été récemment proposé pour reconstituer des paléotempératures dans des mers marginales de moyennes à basses latitudes. Ce nouveau paléothermomètre géochimique n'avait pas encore été testé pour des sédiments de marge avec des apports substantiels en matériel terrigène.

Nous avons analysé ces lipides dans deux carottes de sédiments marins prélevées dans le golfe du Lion, ce qui nous a permis de tester pour la première fois le paléothermomètre RI-OH en Méditerranée occidentale pour la période couvrant les 160 000 dernières années. Alors que les apports terrigènes empêchent l'index TEX86 de se comporter comme un paléothermomètre, l'enregistrement de l'index RI-OH est généralement cohérent avec les autres données paléothermométriques. En particulier, le RI-OH répond de manière systématique et cohérente aux terminaisons glaciaires ainsi qu'aux événements climatiques brusques (événements de Dansgaard-Oeschger et de Heinrich).

La différence moyenne entre les températures RI-OH et les températures de novembre et mai UK'37 (rapport d'insaturation des cétones en C37) est d'environ  $-2,0$  °C avec un écart type de  $0,4$  °C calculé à partir de 249 comparaisons RI-OH-UK'37. Cette différence systématique suggère que les tétraéthers et les alcénones enregistrent des températures différentes, par exemple des températures hivernales ou de subsurface pour RI-OH. Une autre source de biais pourrait être liée à la calibration disponible de l'index RI-OH en fonction de la température, qui nécessite clairement davantage de travail aux niveaux mondial et régional, notamment pour les bassins semi-fermés tels que la mer Méditerranée.

Nos évaluations des réchauffements glaciaires interglaciaires sont d'environ  $10$  °C, une valeur assez élevée en comparaison aux estimations paléothermométriques antérieures publiées pour la mer Méditerranée occidentale (de  $3$  °C à  $13$  °C). Néanmoins, les contrastes de températures basées sur le RI-OH sont généralement compatibles avec les différences régionales et les contrastes saisonniers simulés par les modèles numériques du climat. Cette première étude est prometteuse et nous a conduits à appliquer le nouveau paléothermomètre RI-OH à des carottes de sédiments situées à l'est de l'océan Atlantique.

En parallèle à ces travaux sur l'évolution de l'océan, nous avons étudié les variations paléoenvironnementales en analysant des sédiments terrestres couvrant la période holocène. De nouveaux enregistrements ont été obtenus pour un site en France (Martin *et al.*, 2019) et sur l'île de Malte en Méditerranée (Marriner *et al.*, 2019).

Des études précédentes ont montré que la distribution des tétraéthers de dialkylglycérol et de glycérol ramifiés (brGDGT) est corrélée à la température annuelle moyenne de l'air, permettant donc de construire un indicateur paléoclimatique lacustre. D'autres études ont mis en évidence une production *in situ* de brGDGT dans les lacs. Ces brGDGT ont des distributions différentes de celles qui sont produites dans les sols et leurs mélanges compliquent notablement les reconstructions paléoclimatiques. Il existe très peu d'outils permettant de déterminer les sources de brGDGT dans le présent et de retracer leurs changements dans le passé liés aux changements environnementaux d'origine climatique ou anthropique. On sait que les activités humaines affectent les sols et les écosystèmes aquatiques, en particulier les communautés bactériennes, les impacts spécifiques sur les distributions de brGDGT sont encore peu étudiés.

Nous avons analysé les brGDGT dans les sédiments holocènes et les sols environnants le lac Saint-Front (Massif central, France) en combinaison avec d'autres analyses sédimentologiques, palynologiques et géochimiques (Martin *et al.*, 2019). La comparaison des distributions de brGDGT dans les sédiments et les sols a révélé leur origine mixte. Pour la première fois, nous avons testé la fiabilité du rapport IIIa/IIa dans les lacs, indiquant un passage progressif des sources de brGDGT aquatiques aux sources terrigènes au cours de l'Holocène. Ce changement est corroboré par des indices sédimentologiques et géochimiques. Trois événements avec une forte

proportion de brGDGT terrigènes (6000-5500, 2800-2500 et 2000-200 ans avant le présent) coïncident avec des changements de la végétation dans le bassin versant, entraînés par le climat et/ou les activités humaines. Cela suggère que les modifications de la végétation dans le bassin versant ont un impact sur les distributions de brGDGT et peuvent donc biaiser les reconstructions paléoclimatiques fondées sur les brGDGT.

L'évolution des températures pendant la période de l'Holocène est encore l'objet de controverses, en particulier pour sa partie la plus ancienne. L'existence d'un maximum thermique au début de l'Holocène a été réexaminée récemment et des auteurs ont suggéré des biais liés aux saisons dans les séries paléoclimatiques. La variabilité régionale élevée et le faible nombre de reconstitutions quantitatives fiables et continues compliquent encore l'étude du climat holocène, en particulier pour le domaine continental.

Nos analyses des carottes de sédiments du lac Saint-Front nous ont permis de reconstituer un enregistrement paléoclimatique (Martin *et al.*, 2020), compte tenu de la variation des sources des molécules de brGDGT déjà mentionnée plus haut. Nous avons comparé les reconstitutions paléothermométriques déduites de la distribution du pollen et des brGDGT. Les deux enregistrements présentent un maximum thermique au début de l'Holocène, suivi d'une diminution des températures. Nous avons évalué les biais qui pourraient potentiellement influencer le signal. Il n'y a pas d'évidence d'un biais de température estivale, ni pour les températures dérivées des brGDGT ni pour les températures dérivées du pollen. Les données du lac Saint-Front, en accord avec d'autres données en Europe, confirment donc l'existence d'une période généralement chaude au début de l'Holocène, suivie d'un refroidissement à l'Holocène moyen.

La colonisation des îles par l'Homme pendant l'Holocène a conduit à de profonds changements de la dynamique et de l'écologie des paysages insulaires. En particulier, le brûlage était un outil de gestion couramment utilisé par les sociétés préhistoriques et constituait un facteur majeur de changement environnemental, en particulier à partir du Néolithique. Pour évaluer les premiers impacts humains (par exemple, pâturage et élevage, défrichement des forêts et mises en culture) dans la formation de paysages insulaires « vierges », nous avons réalisé une étude paléoenvironnementale des incendies et de l'érosion à partir de sédiments prélevés sur l'île de Malte (Marriner *et al.*, 2019). Nous montrons que les incendies d'origine anthropique liés aux pratiques agro-pastorales néolithiques ont commencé il y a environ 7 500 ans, avec des intervalles de retour du feu bien définis de 15 à 20 ans, qui ont engendré une érosion et une dégradation rapide de l'environnement. Notre étude suggère que dans un contexte insulaire sensible, il aurait suffi de quelques générations humaines du Néolithique pour dégrader les paysages insulaires naturels.

## PUBLICATIONS

BARONI M., BARD É., PETIT J.-R., VISEUR S. et ASTER Team, « Persistent draining of the stratospheric 10Be reservoir after the Samalas volcanic eruption (1257 CE) », *Journal of Geophysical Research*, vol. 124, n° 13, 2019, p. 7082-7097, <https://doi.org/10.1029/2018JD029823>.

BONVALOT L., TUNA T., FAGAULT Y., SYLVESTRE A., MESBAH B., WORTHAM H., JAFFREZO J.-L., MARCHAND N. et BARD É., « Source apportionment of carbonaceous aerosols in the vicinity of a Mediterranean industrial harbor: A coupled approach based on radiocarbon and molecular tracers », *Atmospheric Environment*, vol. 212, 2019, p. 250-261, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.04.008>.

- BRISSET É., DJAMALI M., BARD É., BORSCHNECK D., GANDOUI E., GARCIA M., STEVENS L. et TACHIKAWA K., « Late Holocene hydrology of Lake Maharlou, southwest Iran, inferred from high-resolution sedimentological and geochemical analyses », *Journal of Paleolimnology*, vol. 61, 2019, p. 111-128, <https://doi.org/10.1007/s10933-018-0048-6>.
- DAVTIAN N., MÉNOT G., FAGAULT Y. et BARD É., « Western Mediterranean Sea paleothermometry over the last glacial cycle based on the novel RI-OH index », *Paleoceanography and Paleoclimatology*, vol. 34, 2019, p. 616-634, <https://doi.org/10.1029/2018PA003452>.
- FAGAULT Y., TUNA T., ROSTEK F. et BARD É., « Radiocarbon dating small carbonate samples with the gas ion source of AixMICADAS », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 455, 2019, p. 276-283, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2018.11.018>.
- FEWLASS H., TALAMO S., KROMER B., BARD É., TUNA T., FAGAULT Y., SPONHEIMER M., RYDER C., HUBLIN J.-J., PERRI A., SÁZELOVÁ S. et SVOBODA J., « Direct radiocarbon dates of mid Upper Palaeolithic human remains from Dolní Věstonice II and Pavlov I, Czech Republic », *Journal of Archaeological Science*, vol. 27, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2019.102000>.
- FEWLASS H., TUNA T., FAGAULT Y., HUBLIN J.-J., KROMER B., BARD É. et TALAMO S., « Pretreatment and gaseous radiocarbon dating of 40-100 mg archaeological bone », *Scientific Reports*, vol. 9, 5342, 2019, p. 1-11, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-41557-8>.
- JOUVE G., VIDAL L., ADALLALA R., RHOJJATI A., BENKADDOUR A., CHAPRON E., TACHIKAWA K., BARD É., COURP T., DEZILEAU L., HEBERT B., RAPUC W., SIMONNEAU A., SONZOGNI C. et SYLVESTRE F., « Recent hydrological variability of the Moroccan Middle Atlas Mountains inferred from microscale sedimentological and geochemical analyses of lake sediments », *Quaternary Research*, vol. 91, n° 1, 2019, p. 414-430, <https://doi.org/10.1017/qua.2018.94>.
- LAMP J.L., YOUNG N.E., KOFFMAN T., SCHIMMELPFENNIG I., TUNA T., BARD É. et SCHAEFER J.M., « Update on the cosmogenic in situ  $^{14}\text{C}$  laboratory at the Lamont-Doherty Earth Observatory », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, vol. 456, 2019, p. 157-162, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2019.05.064>.
- MARRINER N., KANIEWSKI D., GAMBIN T., GAMBIN B., VANNIERE B., MORHANGE C., DJAMALI M., TACHIKAWA K., ROBIN V., RIUS D. et BARD É., « Fire as a motor of rapid environmental degradation during the earliest peopling of Malta 7500 years ago », *Quaternary Science Reviews*, vol. 212, 2019, p. 199-205, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2019.03.001>.
- MARTIN C., MÉNOT G., THOUVENY N., DAVTIAN N., ANDRIEU-PONEL V., REILLE M. et BARD É., « Impact of human activities and vegetation changes on the tetraether sources in Lake St Front (Massif Central, France) », *Organic Geochemistry*, vol. 135, p. 38-52, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2019.06.005>.
- NOUARA A., PANAGIOTOPOULOS C., BALESSENT J., VIOLAKIA K., BARD É., FAGAULT Y., REPETA D.J. et SEMPÉRÉ R., « Liquid chromatographic isolation of individual carbohydrates from environmental matrices for stable carbon analysis and radiocarbon dating », *Analytica Chimica Acta*, vol. 1067, 2019, p. 137-146, <https://doi.org/10.1016/j.aca.2019.03.028>.
- O'HARE P., MEKHALDI F., ADOLPHI F., RAISBECK G., ALDAHAN A., ANDERBERG E., BEER J., CHRISTL M., FAHRNI S., SYNAL H.-A., PARK J., POSSNERT G., SOUTHON J., BARD É., ASTER Team et MUSCHELER R., « Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2610 BP ( $\approx$  660 BC) », *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 116, 2019, p. 5961-5966, <https://doi.org/10.1073/pnas.1815725116>.
- PIVOT S., BARONI M., BARD É., GIRAUD X. et ASTER TEAM, « A comparison of  $^{36}\text{Cl}$  nuclear bomb inputs deposited in snow from Vostok and Talos Dome, Antarctica, using the  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$ -ratio », *Journal of Geophysical Research*, vol. 124, n° 20, 2019, p. 10973-10988, <https://doi.org/10.1029/2018JD030200>.