

ÉVOLUTION DU CLIMAT ET DE L'OCÉAN

Édouard BARD

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

Mots-clés : évolution, climat, océan, méthane

Les colloques « Les aérosols carbonés : impacts sur le climat et la qualité de l'air » et « Climat, énergie et société : le Collège de France et la COP21 » sont disponibles, en audio et/ou en vidéo, sur le site internet du Collège de France (http://www.college-de-france.fr/site/edouard-bard/symposium-2015-2016__1.htm et <http://www.college-de-france.fr/site/edouard-bard/symposium-2015-2016.htm>).

ENSEIGNEMENT

COURS – LE MÉTHANE ET LE CLIMAT

Introduction

Le cours a été consacré au méthane et à son rôle dans le climat de la Terre. Nous avons étudié le cycle du CH₄ et ses évolutions récentes, les variations spatiales des concentrations et des sources de CH₄, ainsi que les évolutions naturelles et anthropiques au cours des dernières décennies, des derniers siècles et millénaires. Ceci nous a permis d'identifier les liens entre le CH₄ et les changements paléoclimatiques. Nous avons enfin abordé le cas spécifique des hydrates de méthane.

Cours 1 – Cycle du CH₄ et évolutions récentes dans l'atmosphère

Le méthane (CH₄) est un hydrocarbure présent naturellement dans l'atmosphère à une concentration de l'ordre du ppm (partie par million en volume). Il a été découvert au XVIII^e siècle par Alessandro Volta qui étudia la composition du gaz des marais.

Dès cette époque, on reconnaît l'utilité du méthane comme combustible pour les lampes et son potentiel comme explosif.

Les modes de formation du CH_4 à partir de la matière organique sont multiples. On en distingue trois types :

- le méthane biogénique lié à la décomposition de la matière organique dans les zones humides (marécages, rizières, etc.) ou par les animaux (ruminants, termites, etc.). Essentiellement deux voies chimiques font intervenir des bactéries fermentaires produisant de l'acétate ou du formate. En conditions anoxiques, les bactéries méthanogènes génèrent le CH_4 par fermentation acétique ou par réduction du CO_2 par l'hydrogène ;
- le CH_4 thermogénique issu de la diagénèse et de la catagénèse du kérogène des roches mères, où il forme le gaz naturel. On le trouve aussi dans les mines de charbon (grisou) ;
- le CH_4 pyrogénique produit par combustion incomplète dans les feux de biomasse naturels ou anthropiques.

Après émission dans l'atmosphère, le CH_4 est oxydé rapidement. La chaîne réactionnelle est complexe, faisant intervenir des radicaux libres hydroxyles (OH) produits par photolyse de l'ozone en présence de vapeur d'eau ($\approx 10^6$ molécules/cm³ d'air dont la durée de vie moyenne est de l'ordre de la seconde). La chaîne réactionnelle principale fait intervenir les oxydes d'azote et produit de l'ozone. En revanche, si la teneur en NO est faible, l'ozone est consommé par la réaction. En plus de ces réactions, il existe d'autres voies secondaires de dégradation du CH_4 (réaction avec le chlore atmosphérique et consommation par les bactéries méthanotrophes des sols).

La mesure directe des teneurs atmosphériques en OH étant difficile, la concentration moyenne est déduite de l'étude de la dégradation du trichloroéthane dont les émissions anthropiques et les concentrations atmosphériques sont connues. Cette approche permet de déduire une durée de vie moyenne de l'ordre de dix ans pour le CH_4 atmosphérique. Les estimations de la dégradation globale du méthane par les radicaux OH varient entre 450 à 620 Tg/an (téraграмme : 10^{12} g/an) auxquels s'ajoutent 50-170 Tg/an pour les réactions secondaires.

L'importance climatique du méthane est liée au fait que c'est un gaz à effet de serre qui absorbe une partie du rayonnement solaire incident et du rayonnement infrarouge émis par la Terre. La molécule de CH_4 présente quatre modes de vibrations avec une absorption principale se situant vers une longueur d'onde de 8 μm . Un modèle radiatif, permet de calculer et de comparer l'effet réchauffant d'une même augmentation de CH_4 et de CO_2 de l'ordre d'une dizaine de ppm. Le CH_4 est environ 20 à 30 fois plus réchauffant, ce qui souligne son importance climatique.

Aujourd'hui, la concentration atmosphérique en CH_4 est d'environ 1,84 ppm (1 840 ppb ou partie par milliard en volume). Son évolution n'est mesurée précisément que depuis les années 1980, mais il est possible de prolonger l'enregistrement en analysant les bulles occluses dans les glaces polaires. On constate qu'après une stabilité plurimillénaire autour de 600-700 ppb, la teneur moyenne a augmenté de façon drastique (multipliée par 2,5) depuis le début de l'ère industrielle, pour atteindre aujourd'hui une valeur d'environ 1 840 ppb.

On peut calculer le forçage radiatif supplémentaire lié à cette augmentation de CH_4 , en tenant compte du chevauchement des bandes d'absorption avec le N_2O qui a aussi augmenté dans l'atmosphère. Le méthane représente une fraction significative

($\approx 15\%$) du forçage additionnel en gaz à effet de serre depuis le début de l'ère industrielle.

En fait, ce pourcentage sous-estime l'influence du CH_4 car il faut aussi comptabiliser des effets indirects qui doublent quasiment son impact. La dégradation du CH_4 génère de l'ozone dans la troposphère, ainsi que de la vapeur d'eau dans la stratosphère, ce qui amplifie le réchauffement atmosphérique. Si l'on exprime le forçage radiatif en fonction des émissions, plutôt que des concentrations, le CH_4 représente environ 30 % du forçage climatique additionnel des gaz à effet de serre d'origine anthropique. En comparaison avec le début de l'ère industrielle, le forçage du CH_4 a cru de 1 W/m^2 alors que le CO_2 anthropique a conduit à une augmentation de $1,7 \text{ W/m}^2$.

Par ailleurs, l'augmentation du CH_4 entraîne une diminution des radicaux OH et donc accroît la durée de vie du CH_4 . Pour prendre en compte les différents effets, on introduit la notion de pouvoir de (r)échauffement global (PRG ou PEG) équivalent à celui de la même masse de CO_2 (calculé comme un forçage radiatif cumulé sur une certaine durée après l'injection). Le PRG est l'intégrale dans le temps de la perturbation radiative associée au rejet instantané de 1 kg d'un gaz à effet de serre dans l'atmosphère (le tout normalisé à la même perturbation en CO_2). Pour le CH_4 , le PRG à 20 ans est de 84, mais il chute à 28 si l'on considère une échéance à 100 ans.

Cours 2 – Variations spatiales des concentrations et des sources de CH_4

À l'échelle de la planète, les sources de méthane, naturelles et anthropiques, sont multiples et disséminées. Pour essayer de les distinguer et de les quantifier, il est d'abord crucial de mesurer les teneurs atmosphériques en CH_4 à l'échelle régionale avec une résolution suffisante pour étudier la saisonnalité des flux. Cette tâche est réalisée grâce à un réseau mondial de plusieurs dizaines de stations situées du pôle Sud au Groenland.

Les enregistrements de pCH_4 montrent des augmentations similaires au cours des dernières décennies, mais avec une différence marquée entre les deux hémisphères. L'excès dans l'hémisphère nord ($> 50 \text{ ppb}$) est lié au fait que les principales sources naturelles et anthropiques sont situées au nord. Le bilan des émissions dans l'hémisphère nord et de la dégradation du CH_4 dans l'atmosphère, notamment par les radicaux OH, montre que l'accumulation annuelle dans l'hémisphère nord est d'environ 275 Tg ce qui correspond au gradient interhémisphérique de pCH_4 .

Les enregistrements des stations situées sur les continents montrent une variabilité de haute fréquence qui contraste avec les tendances régulières, pluriannuelles et saisonnières des stations proches de l'océan. Cette variabilité continentale suggère l'existence de puissantes sources de CH_4 liées à la biosphère terrestre et aux activités humaines.

Les variations du taux d'augmentation annuel (en ppb/an) montrent une tendance à la baisse depuis le milieu des années 1980 à laquelle se superposent des variations interannuelles marquées pour certaines années. Par exemple, l'étude des concentrations en CH_4 et autres gaz (CO_2 , $^{13}\text{CO}_2$, CO , H_2) dans la zone ouest-Pacifique, montre que la nette augmentation observée en 1998-1999 est due à des feux de biomasse. Ceux-ci sont liés au phénomène El Niño qui entraîne une sécheresse sur les continents, notamment dans la zone intertropicale à l'ouest du Pacifique.

Depuis le début des années 2000, les mesures du CH₄ en stations sont complétées par une cartographie par les satellites, notamment ENVISAT avec son instrument SCIAMACHY (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography*) qui a produit des données de 2003 à 2012. Ce spectromètre réalise une analyse passive du rayonnement solaire réfléchi, transmis et rétrodiffusé par l'atmosphère, ce qui permet la mesure globale des gaz atmosphériques à l'état de traces.

La cartographie SCIAMACHY des concentrations de CH₄ confirme l'excès de l'hémisphère nord où se trouvent la plupart des sources. Les maxima régionaux sont localisés au-dessus des zones humides naturelles ou cultivées (comme les rizières), des régions peuplées (en particulier celles avec de l'élevage), ainsi que des zones d'extraction d'hydrocarbures et de charbon. Les satellites détectent même les fuites de CH₄ liées à la fracturation hydraulique réalisée pour extraire les hydrocarbures et gaz de schiste.

La mesure de la composition isotopique du CH₄ atmosphérique permet de préciser l'identification des sources. À cause de multiples fractionnements cinétiques, le rapport ¹³C/¹²C peut varier de plus de 60 ‰ pour des méthanes d'origines variées, biogénique à thermogénique. La mesure des isotopes de l'hydrogène (rapport D/H) en parallèle au ¹³C/¹²C ajoute encore à la possibilité de discriminer les sources. On constate une forte saisonnalité du ¹³C/¹²C du CH₄ atmosphérique aux hautes latitudes de l'hémisphère nord. La baisse estivale du rapport ¹³C/¹²C traduit l'influence du CH₄ issu de la dégradation microbienne des zones humides.

En outre, les réactions d'oxydation du CH₄ conduisent aussi à des fractionnements isotopiques : les molécules à isotopes légers sont oxydées préférentiellement, ce qui entraîne un enrichissement en isotopes lourds du méthane résiduel de l'atmosphère. Les valeurs de ¹³C/¹²C et de D/H dans l'hémisphère sud sont systématiquement plus élevées que celles de l'hémisphère nord. Ce gradient est lié au fait que les sources majoritaires sont dans l'hémisphère nord et que cet excès de CH₄ a moins le temps de réagir que le CH₄ de l'hémisphère sud. Après quelques débats récents sur le sujet, les enregistrements pour les deux dernières décennies ne montrent pas d'évolution marquée des gradients isotopiques entre les deux hémisphères, ce qui traduit une certaine stabilité temporelle des différentes sources de CH₄.

Pour étudier les échanges de méthane, il est utile de considérer sa teneur en ¹⁴C qui est un isotope radioactif avec une demi-vie de 5 700 ans. Pour un réservoir particulier du cycle du carbone, le rapport ¹⁴C/¹²C dépend de sa taille et de la vitesse des échanges avec l'atmosphère. Le méthane a le même rapport ¹⁴C/¹²C que la matière organique dont il est issu par dégradation bactérienne. Le CH₄ d'origine fossile est quant à lui dépourvu de ¹⁴C, cet isotope ayant disparu par radioactivité depuis la formation par photosynthèse des carbonnes fossiles, il y a des millions d'années.

Le carbone récent est affecté par deux perturbations anthropiques transitoires qui ont perturbé l'équilibre naturel du rapport ¹⁴C/¹²C du CO₂ atmosphérique : la combustion de fiouls fossiles qui dilue le ¹⁴C atmosphérique, et le ¹⁴C artificiel produit par les essais thermonucléaires atmosphériques des années 1960. Pour le CH₄ atmosphérique, il faut aussi tenir compte d'un flux anthropique de ¹⁴CH₄ produit directement par les réacteurs nucléaires à eau pressurisée (REP).

Depuis la fin des années 1980, les mesures directes du rapport ¹⁴C/¹²C du CH₄ atmosphérique montrent une augmentation continue liée à la superposition de ces différentes causes (notamment aux REP). Une modélisation numérique simplifiée du

rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ atmosphérique moyen à l'échelle mondiale permet de simuler le cumul et la dégradation des différentes contributions en méthane (fossile, biogénique et thermogénique), ainsi qu'en $^{14}\text{CH}_4$ provenant des réacteurs nucléaires. Cette modélisation permet d'estimer à environ 20 à 30 % la fraction fossile du flux global de CH_4 vers l'atmosphère.

Cours 3 – Contributions naturelles et anthropiques actuelles et passées

Un inventaire des émissions naturelles et anthropiques est compilé au niveau de chaque pays, le cumul permettant d'estimer les sources globales de méthane. La base de données EDGAR montre une augmentation d'environ 260 Tg de CH_4 en 1970 à environ 350 Tg en 2005. Cette tendance est associée à une modeste augmentation annuelle pour la période 1970-1992, à une stabilisation pendant la période 1993-2000, suivie d'une reprise de l'augmentation des émissions de méthane. Celles-ci sont dominées par l'agriculture, l'extraction de combustibles fossiles et le stockage des déchets. Après l'an 2000, la production mondiale de charbon a augmenté rapidement, ce qui explique le flux croissant de CH_4 . En parallèle aux émissions anthropiques, il est aussi nécessaire de cartographier les zones humides naturelles (tourbières, marais, etc.) afin d'estimer leur production. Cette approche montante (*bottom-up*) d'agrégation des émissions de CH_4 converge vers un flux global de CH_4 d'environ 550 Tg/an.

En parallèle, il est possible de calculer les flux de CH_4 en suivant une approche descendante (*top-down*) qui utilise des modèles numériques de transport et de chimie atmosphérique. Les entrées des modèles sont les observations des teneurs en CH_4 (et $^{13}\text{CH}_4$) ainsi que les inventaires d'émissions. Les entrées sont discrétisées en fonction du temps et de l'espace, et les modèles sont utilisés en mode inverse pour en déduire les champs de flux de CH_4 (en fait les affiner par rapport aux inventaires *a priori*).

Les cartes saisonnières des émissions de CH_4 permettent de localiser et de quantifier finement les sources comme les zones humides et les feux de savanes en Afrique, ou les régions d'agriculture et d'élevage en Asie. Les zones d'extraction du charbon sont aussi bien visibles au nord de la Chine ou en Afrique du Sud.

Les résultats de l'inversion des flux peuvent être considérés par bandes de latitudes. Depuis le milieu des années 1980, les calculs montrent que la variabilité interannuelle globale est expliquée essentiellement par des fluctuations en zone tropicale. Les variations ont été marquées par deux excursions majeures au début et à la fin des années 1990. Cette dernière est liée à l'événement El Niño extrême de 1998, pendant lequel une sécheresse a intensifié les feux de forêt en Asie engendrant un flux important de CH_4 pyrogénique.

L'anomalie de 1991-1992 est liée d'une part à l'éruption majeure du volcan Pinatubo en 1991 et d'autre part à l'effondrement de l'économie soviétique. L'éruption du Pinatubo permet d'étudier la complexité des phénomènes agissant sur la production et la destruction de CH_4 . En effet, les aérosols volcaniques ont conduit à une diminution des UV et donc à une diminution de la production de radicaux OH, ce qui a limité la destruction du CH_4 par oxydation. Par ailleurs, le refroidissement estival lié au forçage climatique de l'éruption a induit une diminution des sources tropicales humides de CH_4 .

Les calculs d'inversion des sources permettent de dresser un bilan temporel par processus. Les zones inondées sont à l'origine des plus fortes variations

interannuelles des flux alors que les feux de biomasse y contribuent nettement moins. Les émissions anthropiques diminuent depuis le début des années 1990, ce qui a conduit à la baisse du taux de croissance atmosphérique pendant cette décennie. En plus de la chute de l'économie soviétique avec sa baisse de l'extraction des fiouls fossiles, plusieurs pays développés ont pris des mesures pour réduire les émissions liées au stockage des déchets. Au début des années 2000, les émissions anthropiques ont recommencé à augmenter, ce qui serait lié à la croissance chinoise associée à une intense production de charbon.

Une approche montante complémentaire provient de la simulation du méthane en modélisant explicitement les flux avec un modèle numérique représentant les processus du cycle du carbone. Ces flux modélisés sont ensuite utilisés comme entrées d'un modèle de transport et de chimie atmosphérique.

Les modèles dynamiques de végétation globale (*DGVM*) représentent la biosphère terrestre avec une dizaine de types fonctionnels de plantes (*PFT*). La biosphère est discrétisée sur les continents à l'échelle globale. Des lois empiriques, macroscopiques, paramétrisent les processus biologiques et physiologiques : par exemple la respiration des plantes en fonction de la température ou de l'humidité, les effets de la $p\text{CO}_2$ atmosphérique sur la productivité végétale...

Des modules numériques spécifiques traitent des processus de formation et de dégradation du CH_4 . Les mécanismes locaux sont multiples et complexes depuis la dégradation de la matière organique des sols par les bactéries méthanogènes jusqu'à la diffusion du CH_4 gazeux vers l'atmosphère. Néanmoins, ces processus peuvent être approximés par des lois simples au niveau des écosystèmes : par exemple, la sensibilité à la température des flux de méthane suit globalement une loi d'Arrhenius. L'intercomparaison des simulations des flux de CH_4 par ces modèles fait encore apparaître de nombreux désaccords, notamment au niveau des zones humides. L'intérêt de ces modèles est aussi de permettre d'étudier leur réponse à des perturbations importantes de la température, de l'humidité et de la $p\text{CO}_2$.

La synthèse des approches montantes (*bottom-up*) et descendantes (*top-down*) permet de montrer la compatibilité des estimations, au niveau régional et pour les différents types de processus conduisant aux émissions de CH_4 : zones humides, combustion de biomasse, fiouls fossiles, agriculture, décharges...

Le bilan général pour la décennie 2000 fait état de sources naturelles d'environ 347 Tg/an et de sources anthropiques pour environ 315 Tg/an. L'estimation du « puits » atmosphérique de dégradation du CH_4 par les $\cdot\text{OH}$ et d'autres mécanismes est d'environ 632 Tg/an, ce qui ne compense pas totalement les émissions annuelles (total de 662 Tg/an). Ce déséquilibre est à l'origine de l'augmentation de la teneur atmosphérique décrite précédemment.

Cours 4 – Méthane et changements paléoclimatiques

La synthèse des approches montantes et descendantes permet d'évaluer les flux au cours des trois décennies caractérisées par une stabilisation dans les années 1990 puis par une reprise de l'augmentation des teneurs en CH_4 durant les années 2000. L'explication la plus probable serait une diminution transitoire des émissions de CH_4 liée à une baisse relative de l'extraction et de l'utilisation de combustibles fossiles.

Les bulles d'air occluses dans les glaces polaires permettent de remonter au-delà de la période industrielle récente pendant laquelle la teneur atmosphérique de CH_4 a presque triplé. En comparaison, les variations de la période de l'Holocène

(11 500 dernières années avant le présent [BP]) sont nettement plus faibles, quoique bien réelles et cohérentes entre les deux hémisphères. On observe une diminution d'environ 100 ppb de 11 000 à 6 000 ans BP suivie d'une croissance depuis environ 4 000 ans BP. Les teneurs en CH₄ des bulles d'air au Groenland sont un peu supérieures à celles mesurées pour l'Antarctique, ce qui indique des flux en provenance de la biosphère continentale.

Pour mieux comprendre la variabilité holocène, il est utile de considérer les variations du CH₄ à beaucoup plus long terme. Au cours du dernier million d'années, les teneurs atmosphériques présentent une cyclicité d'environ 20 000 ans. Les maxima de CH₄ correspondent à des épisodes de forte insolation aux latitudes subtropicales de l'hémisphère nord. La périodicité de ces phases est liée aux cycles de la précession des équinoxes.

La comparaison des teneurs en CH₄ pendant les différentes phases interglaciaires, fait apparaître une particularité de l'Holocène. C'est en effet, la seule période interglaciaire pendant laquelle les teneurs en CH₄ divergent notablement par rapport à un forçage astronomique d'insolation décroissante. En supposant que la teneur en CH₄ devrait suivre l'insolation, il est possible d'estimer le début de la divergence vers 5 000 ans BP et l'amplitude de l'anomalie à plus de 200 ppb avant la perturbation récente de l'ère industrielle.

Le paléoclimatologue Bill Ruddiman attribue cette singularité de l'Holocène à une influence anthropique préhistorique. C'est en effet pendant l'Holocène que les sociétés humaines néolithiques se sont développées en inventant l'agriculture et l'élevage dans plusieurs foyers au Proche-Orient, en Asie et en Amérique. Ces inventions ont ensuite diffusé à l'échelle du globe et les pratiques agricoles et pastorales ont été optimisées progressivement.

La culture du riz en Asie est probablement à l'origine de la divergence observée pour les teneurs de CH₄ vers 5 000 ans BP. Les premières cultures ont été réalisées sous la forme de riz « pluvial » cultivé en plein champ sans être immergé. Par la suite, les sociétés protohistoriques ont développé une riziculture inondée (où le niveau d'eau n'est pas contrôlé), puis une riziculture irriguée (où la présence d'eau et son niveau sont contrôlés par les cultivateurs). Cette révolution agricole et la croissance démographique associée sont responsables d'une méthanogénèse intense, comme l'illustre la cartographie actuelle de pCH₄ par les satellites.

Les données archéologiques et archéobotaniques permettent d'étudier la diffusion de la culture du riz à partir des foyers chinois et indien du milieu de l'Holocène. Des flux de CH₄ peuvent être estimés en faisant quelques hypothèses sur la démographie et les pratiques agricoles. Il y a un millénaire, les rizières asiatiques représentaient environ 35 % des surfaces cultivées d'aujourd'hui. Le flux de CH₄ correspondrait à environ 30 Tg/an, ce qui expliquerait environ 70 ppm de l'anomalie observée par rapport à l'évolution naturelle liée à la modulation cyclique de l'insolation.

En parallèle à la riziculture, d'autres pratiques agricoles néolithiques ont contribué à l'augmentation du méthane. Une part importante serait due à l'extension des brûlis pour défricher et fertiliser les sols. En outre, les populations néolithiques, de l'Afrique jusqu'en Asie, ont domestiqué plusieurs espèces de ruminants dont la production de CH₄ aurait participé depuis 7 000 ans BP à l'anomalie atmosphérique observée.

Pour la période historique des derniers 2 000 ans, les carottes de glace du Groenland et de l'Antarctique donnent accès à un enregistrement à haute résolution de la teneur en CH₄. La gamme de variations est relativement faible (< 100 ppb),

avec une augmentation d'environ 50 ppb vers l'an 1000 et quelques baisses transitoires rapides (par exemple un peu après 1200 et un peu avant 1600 AD).

Pour localiser les sources de cette variabilité, il est utile de considérer les corrélations spatio-temporelles entre l'enregistrement de $p\text{CH}_4$ et les données paléoclimatiques spatialisées (températures, précipitations et index de sécheresse). Pour la période de 1300 à 1800 AD, on observe une correspondance entre la $p\text{CH}_4$ et l'index de sécheresse en Chine du Sud. En outre, certains minima de $p\text{CH}_4$ correspondraient à des événements socio-économiques, comme les invasions mongoles et manchoues qui ont perturbé transitoirement la production agricole chinoise.

Une technique complémentaire pour identifier les sources est de mesurer la composition isotopique du CH_4 , notamment son rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. La période historique se caractérise par des maxima du rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ centrés vers les années 200, 1000 et 1400 AD, puis d'une baisse marquée jusqu'à l'année 1800, suivie d'une montée rapide et continue jusqu'à présent.

Comme pour le CO_2 atmosphérique (voir cours des années précédentes), il est possible de procéder à une déconvolution des principales sources (feux de biomasses, CH_4 biogénique et fiouls fossiles) en utilisant un modèle de réservoir atmosphérique simulant le mélange et la dégradation du CH_4 .

Les calculs montrent que des sources naturelles et anthropiques sont susceptibles d'avoir contribué aux changements de CH_4 et $^{13}\text{CH}_4$ observés avant la période industrielle récente. Les feux de biomasse auraient été à leur maximum pour les périodes autour des années 200, 1000 et 1500 AD. La diminution observée après l'an 200 serait liée à la baisse démographique qui a suivi les effondrements de l'Empire romain et de l'empire des Hans en Chine (avec une baisse notable des émissions liées au charbon de bois utilisé pour la métallurgie). Les variations pendant la période médiévale seraient liées aux conditions climatiques qui ont affecté la productivité des zones humides et les feux de forêts, ainsi qu'à des causes démographiques ayant entraîné une réduction des feux de biomasses et une augmentation des émissions de CH_4 par la riziculture et l'élevage.

Le monoxyde de carbone (CO) analysé dans les bulles d'air des glaces polaires est un traceur de combustion complémentaire. Son enregistrement pour la période historique confirme la baisse générale des feux de biomasse après le Moyen Âge. Un découplage entre CO et $^{13}\text{CH}_4$ après 1500 AD pourrait être lié à l'effondrement démographique des Amérindiens qui pratiquaient des feux de prairies systématiques.

Cours 5 – Évolutions actuelles et passées du méthane et des clathrates

Les variations de la teneur en CH_4 mesurées dans la carotte de glace EPICA Dôme-C en Antarctique permettent de remonter jusqu'à 800 000 ans BP. Les fluctuations à long terme peuvent s'expliquer par la superposition des composantes cycliques correspondant aux paramètres de l'orbite terrestre (précession, obliquité et excentricité). Le forçage astronomique a fait varier l'insolation saisonnière aux différentes latitudes ce qui a conduit à des migrations de la zone de convergence intertropicale et des changements dans les systèmes de mousson. Ces variations climatiques ont influencé les sources et les puits de méthane de la zone intertropicale.

En soustrayant la composante cyclique de l'enregistrement brut de $p\text{CH}_4$, on peut extraire une composante de haute fréquence. Celle-ci est manifestement en corrélation avec les variations rapides de température observées dans l'hémisphère

nord (événements de Dansgaard-Oeschger (DO) identifiés dans les glaces du Groenland). Cette variabilité rapide du CH_4 est aussi corrélée aux changements de la mousson asiatique enregistrée dans les stalagmites chinois. L'événement DO le plus récent (DO1 ou Bölling-Alleröd) permet d'étudier avec grande précision le déphasage entre le CH_4 atmosphérique et la température du Groenland. Les résultats montrent que les deux paramètres ont évolué de façon quasiment synchrone avec un décalage inférieur à 25 ans.

En considérant le gradient interhémisphérique de pCH_4 sur la même période (différence entre les enregistrements du Groenland et de l'Antarctique), il est possible de proposer des scénarios d'émissions du CH_4 faisant intervenir à la fois des sources boréales liées au réchauffement, ainsi que des sources tropicales liées à la réactivation des zones humides. Pour aller plus loin dans la discrimination des sources, le rapport $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ a été mesuré en parallèle à la pCH_4 pour la dernière période glaciaire. De façon surprenante, les variations du $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ du CH_4 ne sont pas corrélées avec celles de la pCH_4 , mais elles suivent les fluctuations de la pCO_2 atmosphérique. Il y aurait donc aussi un contrôle par le CO_2 sur les écosystèmes tropicaux produisant le CH_4 , notamment sur les rapports entre plantes en C3 et C4, les premières étant favorisées par les hausses de la pCO_2 .

En contrepoint à ces mécanismes impliquant des sources continentales, le paléocéanographe Jim Kennett a proposé une hypothèse alternative faisant intervenir des hydrates de CH_4 marins. Cette suggestion est fondée sur des observations régionales dans les sédiments au large de la Californie. Les enregistrements sédimentaires montrent des anomalies du $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ et la présence de certains traceurs moléculaires (diplopterol par exemple) qui sont des signatures de relargages de CH_4 marin pendant les phases chaudes de la variabilité DO caractérisées par des maxima de pCH_4 .

Dans un clathrate (ou hydrate de gaz), le CH_4 est piégé dans une structure cristalline avec des molécules d'eau formant une cage entourant les molécules de gaz. Le méthane formé par méthanogénèse dans le sédiment est stabilisé sous forme d'hydrates à basse température et à haute pression (par exemple 0 °C et 30 bars). Les clathrates étant moins denses que l'eau, ils ne peuvent être préservés que dans le sédiment. Néanmoins, la température augmentant avec la profondeur (gradient géothermique général), les clathrates ne sont plus stables à partir d'une certaine profondeur dans le sédiment (< 1 km). Il se forme donc une couche de clathrates qui peut être localisée et cartographiée par analyse sismique du réflecteur lié au contraste solide-gaz. Les clathrates marins sont localisés majoritairement sur les marges continentales à des profondeurs supérieures à 500 m. L'inventaire actuel des hydrates de CH_4 est approximativement de 1 800 Gt de carbone, ce qui est énorme en comparaison avec le stock atmosphérique de CH_4 (\approx 4 GtC).

Le rapport D/H du CH_4 des clathrates marins est beaucoup plus élevé que celui des sources provenant des zones humides continentales. Le D/H du CH_4 des bulles d'air des glaces polaires a donc été mesuré pour tester l'hypothèse de la responsabilité des clathrates marins pour expliquer la variabilité glaciaire du CH_4 atmosphérique. On enregistre en fait des baisses du D/H pendant les événements DO, ce qui est incompatible avec une source marine. Cette conclusion est confirmée par les teneurs en ^{14}C du CH_4 des bulles d'air occluses dans les glaces du Groenland, qui ont été analysées pour la dernière transition tardiglaciaire (Dryas récent-Préboréal). Au lieu de diminuer fortement pendant la transition, le $^{14}\text{CH}_4$ reste stable, ce qui est compatible avec du CH_4 en provenance des zones humides continentales.

Même si les clathrates ne semblent pas responsables de la variabilité climatique DO, il est important de poursuivre l'étude de leurs mécanismes de déstabilisation qui pourrait augmenter la $p\text{CH}_4$ atmosphérique dans le futur.

Il faut d'abord souligner que, après déstabilisation des clathrates, le CH_4 qui diffuse dans la colonne d'eau est progressivement réoxydé en CO_2 par des bactéries méthanotrophes. C'est notamment le cas du CH_4 provenant des suintements froids (*cold seeps*) qui sont des lieux sous-marins profonds d'émanation à basse température ($< 40^\circ\text{C}$) de nombreux gaz comme l'hydrogène sulfuré (H_2S) et des hydrocarbures. Pour que le CH_4 atteigne l'atmosphère, il faut que les hydrates déstabilisés soient localisés dans des sédiments peu profonds. Néanmoins, ceux-ci sont généralement pauvres en clathrates : seulement quelques pourcents du stock global se trouvent à des profondeurs inférieures à 500 m.

En lien direct avec le réchauffement mondial actuel, l'océan absorbe une part prépondérante de la chaleur qui diffuse peu à peu en profondeur. Il est donc légitime de se soucier du devenir des clathrates piégés dans les sédiments océaniques. La déstabilisation des hydrates de CH_4 est un phénomène lent car la chaleur progresse lentement dans les sédiments. Une perturbation de température à la surface des sédiments mettra environ un millénaire pour parvenir, atténuée de moitié, à 200 m de profondeur.

Plusieurs cas ont été abordés quant à la pénétration d'un changement de température dans les sédiments sous des hauteurs d'eau variées. Pour un réchauffement théorique de 1°C pendant un siècle, la déstabilisation serait minime pour des clathrates situés à plus d'un km de profondeur. Seuls les rares hydrates situés à moins de 500 m seraient affectés. Un cas de relargage de CH_4 océanique a été mis en évidence au large du Spitzberg à des profondeurs de quelques centaines de mètres qui se sont réchauffées au cours des dernières décennies.

En plus des clathrates océaniques, il existe aussi des hydrates de CH_4 continentaux situés sous le pergélisol (ou permafrost) aux hautes latitudes de l'hémisphère nord. Ces clathrates représenteraient environ 1 % de l'inventaire des hydrates de CH_4 . Même avec des températures froides en surface, le pergélisol a une épaisseur limitée à quelques dizaines ou centaines de mètres à cause du gradient géothermique.

En phase avec le réchauffement de la zone arctique, des évidences de fonte du pergélisol ont été observées avec formation de lacs thermokarstiques. Plusieurs études de la fermentation de la matière organique et du relargage de CH_4 dans les lacs arctiques permettent de distinguer plusieurs types de suintements de CH_4 superficiels ou profonds (*subcap seeps*). Des analyses isotopiques du CH_4 (D, ^{13}C et ^{14}C) sont utilisées pour distinguer les différentes origines du carbone.

Des flux systématiques de CH_4 vers l'atmosphère ont été observés en mer de Laptev et une grande partie des eaux côtières de la Sibérie est sursaturée en CH_4 . Il ne s'agit pas de déstabilisation de clathrates marins, mais du relargage d'hydrates situés sous le permafrost qui a été inondé lors de la dernière transgression marine postglaciaire. À cause de ce phénomène, un fort changement de température s'est propagé dans le permafrost recouvert aujourd'hui d'une faible tranche d'eau marine.

Même si cette contribution des hydrates au CH_4 atmosphérique n'est encore que la réponse naturelle au réchauffement postglaciaire, cela ne doit pas nous faire oublier que le réchauffement global est amplifié en zone polaire. Ceci devrait accélérer le phénomène de déstabilisation des hydrates continentaux qui pourrait contribuer à l'augmentation de la teneur atmosphérique de CH_4 . Néanmoins, le flux actuel de

CH₄ lié aux hydrates en général semble encore très faible ($\approx 1\%$) par rapport aux autres sources de CH₄ naturelles et anthropiques.

AUTRES ENSEIGNEMENTS

Deux colloques ont été organisés pour compléter les dix cours à Paris, aux Instituts Max-Planck d'anthropologie évolutionniste (Leipzig) et de chimie (Mayence), ainsi qu'à l'université de l'île Maurice.

Séminaire 1 – Colloque « Les aérosols carbonés : impacts sur le climat et la qualité de l'air »

17 juin 2016, amphithéâtre Marguerite de Navarre

Les aérosols atmosphériques, communément appelés « particules fines » sont le sujet de multiples inquiétudes. Environ un tiers (jusqu'à 70 %) de ces particules est constitué de composés carbonés, provenant de sources anthropiques ou naturelles, notamment biogéniques. Ces aérosols en suspension dans la basse atmosphère affectent le climat au niveau régional et global par interaction directe avec le rayonnement solaire ainsi que par d'autres influences complexes sur la formation et la durée de vie des nuages. La fraction appelée « carbone suie » (ou *black carbon*) conduit à un chauffage radiatif en augmentation importante depuis le début de la période industrielle. Selon certains auteurs, il s'agirait de la deuxième source de réchauffement anthropique, derrière celle liée à l'augmentation de la pression partielle de gaz carbonique.

Par ailleurs, les effets des particules fines sur la santé, notamment l'appareil respiratoire, sont établis avec certitude aussi bien dans le cas de pollutions extrêmes de courtes durées ou d'expositions chroniques à long terme. À l'échelle globale, plusieurs millions de décès prématurés seraient causés par cette pollution en aérosols, notamment les particules carbonées les plus toxiques.

Après avoir exposé le contexte général, le professeur Édouard Bard a montré que l'analyse des aérosols déposés dans des archives comme les sédiments ou les glaces permet d'étudier leur évolution temporelle et de distinguer les apports naturels des effets anthropiques. Il a aussi décrit l'importance de la mesure du carbone 14 des aérosols carbonés pour séparer les différentes sources en carbones fossiles et modernes.

Jean-Luc Jaffrezo, chercheur au Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement à Grenoble, a présenté la complexité de l'aérosol atmosphérique, tant au niveau de ses propriétés chimiques que physiques, tout en reconnaissant qu'une grande partie de sa composition reste indéterminée. Il a ensuite décrit les différentes techniques de caractérisation par des analyses sur site et en laboratoire. La détermination des différentes sources d'émissions est fondée sur certains traceurs chimiques et leur modélisation statistique de déconvolution. Cette double approche données-modèles permet de reconstituer l'évolution temporelle des différentes sources. Elle présente aussi un intérêt pour déterminer la réglementation et proposer des plans de protection de l'atmosphère.

L'importance de la miniaturisation des systèmes de mesure a été présentée par Jean Sciare, professeur au Cyprus Institute. Cette réduction de taille permet une utilisation sur des plateformes mobiles, telles que des drones, donnant accès à une couverture

spatiale hors d'atteinte par les approches classiques. La nécessité des mesures en ligne, en zones urbaines et rurales, a aussi été exposée. Le déploiement de ces outils a permis de caractériser l'influence du transport à longue distance des particules fines en Île-de-France et de montrer la prédominance des sources locales du « carbone suie » (trafic routier et chauffage au bois) dans les épisodes de pollution.

Les effets du carbone suie sur le climat ont été détaillés par Yves Balanski, chercheur au Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement. Cette fraction d'origine anthropique entraîne un forçage climatique dû à ses propriétés d'absorption et de diffusion de la lumière solaire, ainsi qu'à des effets indirects sur les nuages et les glaces. Ces influences engendrent un réchauffement principalement dans l'hémisphère nord, où se concentre la pollution. Dans le détail, les propriétés du carbone suie varient aussi en fonction de la morphologie des particules et de leur composition chimique. Pendant leur temps de résidence dans l'atmosphère, ces particules vont s'entourer d'une pellicule d'eau qui change les propriétés optiques et le forçage radiatif associé.

Encore insuffisamment documentée, la pollution due au carbone suie peut atteindre des niveaux extrêmes dans les mégapoles africaines, telles que Bamako au Mali et Dakar au Sénégal. Pour illustrer le problème, Catherine Lioussé, chercheuse au Laboratoire d'aérodologie de Toulouse, a expliqué l'élaboration d'inventaires d'émissions africaines, fondés sur une approche pluridisciplinaire, prenant en compte la photochimie intense en Afrique. Tenant compte de la forte augmentation de la population, notamment dans les zones urbaines africaines, la recherche est focalisée sur l'exposition aux doses inhalées par la population et l'impact biologique de l'aérosol.

Les effets sur la santé et les mécanismes toxicologiques ont été détaillés par Armelle Baeza, professeure à l'université Paris-Diderot. Déterminée *in vivo* ou *in vitro*, la toxicologie des particules fines dépend de leur taille et de leur composition chimique. Pour un même niveau de concentration massique, une inflammation plus importante est engendrée par les particules de très petites tailles (submicroniques) que par les particules plus grosses. La toxicité est aussi fonction du potentiel oxydant des particules. Celles qui présentent un potentiel fort oxydant engendrent un déséquilibre des cellules concernées, avec une inflammation pendant les épisodes de pollution. Une exposition à long terme entraîne une bioaccumulation des particules dans le système respiratoire pouvant conduire à une cancérogénèse. Armelle Baeza souligne que les particules fines ont aussi des effets sur la reproduction et peuvent engendrer des maladies du métabolisme. Ces effets débute à des niveaux inférieurs aux limites réglementaires.

Le réseau de surveillance de qualité de l'air, géré en France par les AASQA régionales (associations agréées de surveillance de la qualité de l'air) a été présenté par Dominique Robin, directeur d'Air PACA. En région Provence-Alpes-Côte d'Azur, 90 % de la population est exposée à une concentration supérieure aux recommandations annuelles de l'OMS, même si les émissions de particules fines sont en diminution depuis quelques années. Le dispositif de surveillance et d'information se fonde sur les données des stations de mesure ainsi que sur les simulations de la modélisation numérique. Les données collectées sont mises à la disposition du public et des bulletins d'alerte sont émis en cas de dépassements des seuils. Si les missions principales des associations de surveillance de l'air sont les observations réglementaires et de prévision des épisodes de pollution, Dominique Robin a souligné l'importance du partenariat entre les AASQA et les chercheurs

spécialistes de la chimie atmosphérique. L'objectif commun est d'améliorer la connaissance des sources de pollution et la création de « super-sites » afin d'assurer des suivis à long terme.

Les différentes interventions du colloque ont bien montré les progrès récents dans la connaissance des aérosols, tant au niveau de leurs sources d'émission, de leur évolution dans l'atmosphère que de leurs effets néfastes sur le climat et la santé. Cependant les conférenciers s'accordent sur le fait que la majeure partie de l'aérosol reste encore à identifier et qu'il est donc crucial de poursuivre la mise en place de nouveaux réseaux de mesures.

Intervenants :

Édouard Bard (Collège de France et CEREGE d'Aix-en-Provence) : « Introduction et perspective à long terme sur les aérosols carbonés » ;

Jean-Luc Jaffrezo (Laboratoire de glaciologie et de géophysique de l'environnement, Grenoble) : « Caractérisations physico-chimiques des aérosols » ;

Jean Sciare (Cyprus Institute) : « De nouveaux outils expérimentaux pour la caractérisation des sources et des propriétés des aérosols carbonés » ;

Yves Balkanski (Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, Gif-sur-Yvette) : « L'influence climatique des aérosols carbonés » ;

Catherine Lioussé (Laboratoire d'aérodynamique, Toulouse) : « L'aérosol carboné en régions tropicales : émissions anthropiques et impacts sur la qualité de l'air, le climat et la santé » ;

Armelle Baeza (unité de biologie fonctionnelle et adaptative, université Paris-Diderot) : « Impacts toxicologiques des aérosols carbonés » ;

Dominique Robin (Air PACA, Marseille) : « Aérosols et surveillance de la qualité de l'air ».

Séminaire 2 – Colloque « Le Collège de France et la COP21 »

9 novembre 2015, amphithéâtre Marguerite de Navarre

Quelques jours avant l'ouverture de la Conférence de Paris sur le climat (30 novembre-12 décembre 2015) s'est tenu au Collège de France un colloque intitulé « Le Collège de France et la COP21 » en présence du président de la République François Hollande, de la ministre de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Najat Vallaud-Belkacem et du secrétaire d'État chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Thierry Mandon. Dix chercheurs se sont succédé au cours de cette journée afin de dresser le bilan des connaissances actuelles et des initiatives envisageables pour lutter contre le réchauffement climatique et ses conséquences. Le colloque s'est conclu par une table ronde à laquelle ont participé le président de la République François Hollande, l'administrateur du Collège de France Alain Prochiantz et les professeurs Édouard Bard, Philippe Descola et Jean-Marie Tarascon.

Comme l'a souligné Alain Prochiantz dans son introduction générale, la globalité du phénomène climatique oblige à prendre collectivement en compte tous ses aspects : écologiques, économiques, sociologiques, culturels, anthropologiques, politiques et scientifiques.

Même si la gouvernance collective du monde parvient à limiter le réchauffement climatique à hauteur de deux degrés, certaines régions seront durement affectées et nous assisterons à des exodes climatiques, des migrations, dont nous percevons déjà les premières manifestations et qui n'annoncent rien de bon pour la vie démocratique et la paix globale si les réponses apportées relèvent de réflexes animaux de lutte pour l'espace vital. Mais nous pouvons encore espérer que la raison l'emporte. Parce que nous ne

sommes pas des animaux comme les autres, nous sommes en mesure d'anticiper et de travailler ensemble pour que les humains non seulement survivent mais le fassent dans les conditions les moins inhumaines possibles.

Alain Prochiantz a également interpellé le secrétaire d'État chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, Thierry Mandon, sur l'importance cruciale, pour l'élaboration de solutions efficaces et durables, d'un investissement accru de l'État dans la recherche fondamentale.

Il est illusoire de penser que nous pourrions nous en sortir honorablement sans qu'un effort massif soit fait au niveau international en faveur de l'enseignement, de la recherche et de l'innovation. Ce sont des scientifiques qui, grâce aux modèles développés, ont permis de mettre en évidence ce danger. On ne peut plus aujourd'hui nier l'essentiel : oui la température va augmenter, oui les humains en portent une part importante de responsabilité. Et, comme toujours depuis que notre espèce est apparue, ce sont l'imagination et l'invention qui doivent apporter des solutions. Il n'y a plus de temps à perdre. On doit donc se désoler que dans presque tous les pays où la science constitue une activité culturelle et sociale importante, la puissance publique ait par trop négligé ces investissements dans la recherche, surtout dans sa part fondamentale.

En réponse à cette intervention de l'Administrateur, Thierry Mandon a réaffirmé la volonté du gouvernement de soutenir la recherche fondamentale :

On pourrait penser dans le moment que nous vivons que l'urgence impose de se concentrer sur la recherche finalisée. Ce serait faire fausse route. La recherche finalisée n'est rien sans la recherche fondamentale. Il est du devoir des responsables politiques de s'en souvenir, de la soutenir, même si notre temporalité est bien plus courte que celle des scientifiques. Sans des institutions qui s'engagent dans la durée, nous n'aurions pas pu établir scientifiquement le réchauffement climatique, en comprendre les origines, imposer sa réalité et dessiner des issues. La COP21 est plus qu'un événement : la matrice d'une prise de conscience mais surtout d'un état d'esprit durable.

Thierry Mandon rappelle que les solutions à concevoir et à appliquer ne peuvent être uniquement d'ordre technologique :

Le réchauffement climatique étant lié à l'Homme, les sciences humaines et sociales sont absolument déterminantes : le droit, l'économie, la sociologie, la psychologie, l'anthropologie, la philosophie doivent nous guider dans cette nouvelle relation que nous voulons construire avec la nature, dans la manière de penser l'action collective à partir des gestes individuels. Le programme de cette journée est à cet égard remarquable : les trois dimensions qui le structurent esquissent une vision globale des enjeux de la COP21. Nous devons entrer en France dans un nouveau mode relationnel entre les scientifiques et les politiques. On a cru dans le passé au gouvernement des hommes par la science. Une bonne partie de l'histoire du XIX^e siècle en est l'illustration, ou, plus récemment, par la technocratie, qui est de mon point de vue la pire des sciences puisque c'est la science de l'ordre. C'était une illusion. La politique relève de choix complexes et le fondement de la République c'est bien la désignation de représentants qui ont la légitimité de faire des choix collectifs. Mais ces choix doivent reposer aujourd'hui plus que jamais sur l'éclairage des chercheurs, ceux qui rendent lisible la réalité.

Thierry Mandon conclut son intervention en rappelant la devise de Kant, « Tu dois donc tu peux » :

Nous y sommes. Encore faut-il que l'impératif moral qui en résulte dicte les nouveaux comportements qui nous permettront de répondre à ce formidable défi de la lutte contre le changement climatique. Je ne doute pas qu'une initiative comme celle d'aujourd'hui nous donnera de nouveaux outils pour y arriver.

Dix chercheurs se sont ensuite succédé au cours de trois sessions respectivement axées sur le climat, l'énergie et la société. Dans son ouverture de la session consacrée au climat, le professeur Édouard Bard a rappelé que le climat ne se résume pas uniquement à l'atmosphère et dépend également de composantes à évolution beaucoup plus lente comme la banquise, les calottes glaciaires et l'océan dont l'état des lieux et les scénarios d'évolution future sont présentés par Éric Rignot, professeur à l'université de Californie à Irvine et chercheur à la NASA, et Pierre-Yves Le Traon, chercheur à l'Ifremer et à Mercator-Océan à Toulouse. Jochem Marotzke, directeur de l'Institut Max-Planck de météorologie de Hambourg a ensuite décrit l'apport de la modélisation numérique du système climatique, seule voie possible pour faire des projections fiables pour l'avenir. Cette première session s'est terminée par l'intervention du professeur Édouard Bard qui a présenté l'évolution du système climatique à court et à très long terme :

L'année 2100 nous semble encore très éloignée avec ses perspectives de réchauffement de 3 à 5 °C et près d'un mètre d'élévation du niveau marin si nous ne faisons rien pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Pourtant, ce que nous voyons à des horizons plus lointains nous montre que des changements majeurs et quasiment irréversibles sont aussi prévisibles à l'échelle de quelques siècles à plusieurs millénaires. Il est par exemple stupéfiant d'imaginer un monde sans calotte du Groenland, ce qui serait clairement possible si les émissions de CO₂ vers l'atmosphère continuaient de croître. Savoir si nous devons nous soucier de ces perturbations à très long terme est un choix éthique difficile. Mais étudier ces évolutions nous donne les moyens de comprendre les mécanismes et de prendre la pleine mesure de l'empreinte humaine sur l'équilibre environnemental de la Terre. Il faut espérer que notre civilisation industrielle fera preuve de clairvoyance et de sagesse pour préserver les conditions hospitalières sur notre planète pour les prochains siècles. Notre devoir de scientifique est de montrer et d'expliquer les faits, en les résumant sans caricature, mais aussi sans fards. Il est ensuite fondamental que le grand public, les décideurs et les politiques s'emparent collectivement du sujet. La difficulté principale est de voir loin, de prendre aujourd'hui des mesures fortes et de maintenir le cap. Tout l'enjeu est donc de maintenir notre attention à l'horizon 2100 et des prochains millénaires alors même que d'autres urgences immédiates surgiront.

La seconde session consacrée à l'énergie a développé les problématiques liées à l'exploitation et au stockage des énergies renouvelables. Comme l'a souligné le professeur Tarascon :

82 % de l'énergie que nous utilisons aujourd'hui provient des énergies fossiles. Si nous continuons à ce rythme, dans un siècle nous aurons utilisé toutes les énergies fossiles que la Terre aura mis des millions d'années à générer. Comment arrêter ce gaspillage ? Quelles sont les solutions possibles ? La Terre reçoit du soleil 90 % de l'énergie que nous allons utiliser dans une année. Si nous pouvions directement convertir et stocker cette énergie, nous aurions la solution. Nous pourrions décarboner le futur.

Les professeurs Marc Fontecave et Daniel Lincot de l'IRDEP (CNRS-EDF-Chimie ParisTech) ont ensuite exposé les innovations récentes concernant l'exploitation du CO₂ et de l'énergie photovoltaïque, le professeur Tarascon concluant cette session sur la question du stockage et l'avenir des batteries.

Dans la troisième session, « Société », se sont exprimés les professeurs Roger Guesnerie et Mireille Delmas-Marty sur les enjeux économiques du changement climatique et les instruments juridiques qu'ils mobilisent. Elle s'est conclue par l'intervention du professeur Philippe Descola qui a replacé au centre de la réflexion l'apport nécessaire des sciences sociales :

Si l'humanité est depuis 200 000 ans à l'origine d'un mouvement continu d'anthropisation de la terre, ce n'est pas l'humanité tout entière qui est la cause du réchauffement climatique. C'est un système d'usage du monde qui s'est développé en Angleterre à partir du XVIII^e siècle que l'on peut diversement appeler capitalisme industriel, révolution thermodynamique, technocène, productivisme, etc., qui est le fruit de ce que j'ai appelé une ontologie naturaliste. Il est fondé sur cette idée inédite dans l'histoire de l'humanité que la nature est un domaine entièrement extérieur aux humains et qu'elle constitue une ressource infinie permettant une accumulation infinie des richesses grâce au perfectionnement infini des techniques. Et à l'évidence ce système d'usage du monde nous a conduits dans une impasse dont nous commençons seulement à mesurer l'ampleur. Ce que montrent les sciences sociales c'est le caractère historiquement contingent de ce système. Il aurait pu ne pas exister et surtout rien n'indique qu'il est éternel. Elles montrent également que, au-delà des propositions à court et moyen termes que les économistes, les juristes, les géographes, les sociologues, les anthropologues, les historiens peuvent suggérer à partir de leurs analyses, des modèles alternatifs de vie commune sont possibles, se sont déployés sur la scène mondiale et certains d'entre eux sont encore vivaces aujourd'hui. Il ne s'agit pas de transposer tels quels ces modèles de vie commune car aucune expérience historique n'est transposable mais de prendre espoir dans ce foisonnement des modes d'existence afin d'imaginer des nouvelles modalités cosmopolitiques d'organiser des relations entre les humains et les non-humains.

En conclusion de cette journée de colloque s'est tenue une table ronde de plus d'une heure au cours de laquelle sont intervenus le président de la République, François Hollande, et les professeurs Alain Prochiantz, Édouard Bard, Jean-Marie Tarascon et Philippe Descola.

Intervenants :

Alain Prochiantz (administrateur du Collège de France) : « Ouverture du colloque » ;
 Thierry Mandon (secrétaire d'État, chargé de l'Enseignement supérieur et de la Recherche) : « Ouverture du colloque » ;
 Éric Rignot (université de Californie à Irvine et JPL NASA-Caltech) : « Observation des glaces polaires » ;
 Pierre-Yves Le Traon (IFREMER et Mercator Océan, Toulouse) : « Observation de l'océan et de son rôle sur le climat » ;
 Jochem Marotzke (Institut Max-Planck de météorologie, Hambourg) : « Modelling and predicting the evolution of the climate system » ;
 Édouard Bard (Collège de France et CEREGE d'Aix-en-Provence) : « Évolution du système climatique à court et long termes » ;
 Marc Fontecave (Collège de France) : « Que faire du CO₂ ? de la chimie ! » ;
 Daniel Lincot (IRDEP, CNRS EDF-Chimie ParisTech, Chatou) : « Solaire photovoltaïque : une énergie majeure de la transition énergétique » ;
 Jean-Marie Tarascon (Collège de France) : « Stockage de l'énergie via les batteries : quel futur ? » ;
 Roger Guesnerie (Collège de France) : « Économie du changement climatique » ;
 Mireille Delmas-Marty (Collège de France) : « Instruments juridiques des politiques climatiques » ;
 Philippe Descola (Collège de France) : « Comment penser l'Anthropocène » ;
 François Hollande (président de la République française) : « Table ronde et clôture » .

RECHERCHE

L'objectif technique du projet EQUIPEX ASTER-CEREGE coordonné par Édouard Bard, est d'étendre et de diversifier la gamme instrumentale des équipements de géochimie isotopique installés au CEREGE d'Aix-en-Provence, et de les conforter au meilleur niveau international actuel.

Le projet comporte trois volets d'instrumentation complémentaires qui constituent un dispositif expérimental unique sur le plan international :

- un spectromètre de masse par accélérateur (AMS) miniature dédié à la mesure du radiocarbone (^{14}C) de microéchantillons (AixMICADAS), accompagné de son laboratoire de purification du carbone ;
- un spectromètre de masse à source plasma et multicollecteur (MC-ICPMS) accompagné de nouvelles salles blanches pour la préparation des échantillons ;
- une source d'ions plus performante pour l'accélérateur ASTERisques de 5 MV déjà présent sur le site du technopôle de l'Arbois.

Ces trois volets d'équipement sont utilisés de manières combinées pour des recherches suivant quatre thématiques scientifiques principales :

- la reconstitution des variations passées du niveau marin et des mécanismes de déglaciation, pour contribuer à améliorer la modélisation du changement climatique actuel et de la dynamique des glaciers ;
- l'étude du cycle du carbone et des échanges naturels et anthropiques entre l'atmosphère, l'océan, la végétation et les sols grâce au traçage par le ^{14}C (cosmogénique et d'origine thermonucléaire) ;
- l'étude des perturbations géochimiques en cours dans l'environnement en réponse aux changements globaux et aux pressions anthropiques. Une approche novatrice de traçage isotopique multi-élémentaire permet d'étudier la distribution naturelle et la dispersion anthropique de certains métaux ;
- des recherches appliquées nécessitant la mise au point de méthodes de mesures par AMS et MC-ICPMS (qualité des sols et des eaux, contrôle des émissions de carbone et de certains radioéléments, matériaux du nucléaire, etc.).

Durant l'année 2016, nous avons poursuivi les développements du nouveau laboratoire de ^{14}C afin de contribuer à plusieurs projets scientifiques.

Le premier est focalisé sur l'analyse de bois subfossiles. Son objectif est d'améliorer et d'étendre dans le temps la courbe actuelle du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ du CO_2 atmosphérique et de mieux comprendre les variations du taux de production du ^{14}C ainsi que les évolutions du cycle du carbone. En collaboration avec des collègues dendrochronologues (C. Miramont et F. Guibal de l'IMBE d'Aix-en-Provence), des pins sylvestres subfossiles des Alpes du Sud-Est ont été sélectionnés pour compléter la courbe actuelle pendant l'événement climatique du Dyas Récent. Nos nouvelles analyses de ^{14}C ont été réalisées à haute résolution (tous les trois ans) et sont en accord avec les résultats obtenus précédemment, à haute précision mais à basse résolution, par comptage de la radioactivité β sur CO_2 (collaboration avec B. Kromer de l'université d'Heidelberg). La comparaison de notre nouvelle séquence avec celle établie pour la Nouvelle-Zélande permet de calculer le gradient interhémisphérique (GIH) en ^{14}C , avec une valeur moyenne d'environ 50 ans. Le GIH est resté relativement élevé tout au long de la période étudiée (Capano *et al.*, 2017).

Le deuxième projet de recherche concerne la caractérisation du carbone des particules fines atmosphériques pour déterminer les sources naturelles et anthropiques et leurs évolutions dans le temps. Le spectromètre AixMICADAS est

couplé à un analyseur élémentaire connecté à la source d'ions. Ce système permet une mesure rapide et fiable du ^{14}C dans de petits échantillons de 5 à 100 μgC de carbone et pour un rapport isotopique de $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ allant de 10^{-12} à 10^{-15} pour les carbones modernes et fossiles, respectivement. Ceci assure une mesure fiable de toute la gamme pouvant être rencontrée dans les aérosols carbonés.

Nous avons analysé des séries de filtres d'aérosols provenant de la vallée de Chamonix (collaboration avec J.-L. Jaffrezo de l'IGE de Grenoble). Ces analyses nous ont permis de développer un nouveau modèle pour séparer les contributions des combustibles fossiles, des feux de biomasses et des émissions biogéniques (Bonvalot *et al.*, 2016). La combinaison des mesures de ^{14}C et de lévoglucosan renforce les conclusions sur l'importante contribution de la combustion de biomasse aux aérosols hivernaux dans la vallée de l'Arve. L'utilisation de ces deux traceurs est complémentaire : le lévoglucosan permet une identification de la source tandis que le ^{14}C permet une quantification précise des fractions fossiles et non fossiles.

Afin d'atteindre un niveau de connaissance supplémentaire sur la composition des aérosols et la détermination de leurs sources, nous développons l'analyse des rapports $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ des fractions organique et élémentaire du carbone (OC et EC). Nous avons installé un analyseur OC-EC de Sunset Lab grâce à l'obtention d'un financement de la région PACA au Collège de France. Une ligne de piégeage cryogénique a été mise en place en sortie de l'analyseur OC-EC, afin de collecter le CO_2 de chaque fraction qui est ensuite scellé dans des tubes de verre. Ces ampoules seront ensuite placées dans le « cracker » couplé à la source d'ions du spectromètre AixMICADAS afin de réaliser l'analyse du rapport $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$.

Parallèlement aux travaux sur le ^{14}C , la nouvelle source d'ions à haute intensité installée sur l'accélérateur ASTERisques est maintenant opérationnelle, ainsi que le nouveau laboratoire d'extraction chimique du ^{10}Be et du ^{36}Cl . Ces développements nous ont permis d'amplifier nos recherches sur les isotopes cosmogéniques contenus dans les glaces polaires (Junglaus *et al.*, 2016). Nous avons reconstitué les variations de l'activité solaire au cours du dernier millénaire à partir d'une carotte du Dôme Concordia en Antarctique (Baroni *et al.*, en prép). En parallèle à cette étude de la variabilité des derniers siècles, nous avons obtenu un enregistrement de l'événement géomagnétique du Laschamp dans le forage long du Dôme Talos en Antarctique (Baroni *et al.*, en prép).

PUBLICATIONS

BARD É., HAMELIN B., DESCHAMPS P. et CAMOIN G., « Comment on “Younger Dryas sea level and meltwater pulse 1B recorded in Barbados reefal crest coral *Acropora palmata*” by N.A. ABDUL *et al.*: Younger Dryas Sea Level and MWP-1B », *Paleoceanography*, vol. 31, n° 12, 2016, p. 1603-1608, DOI : 10.1002/2016PA002979.

JUNGCLAUS J.H., BARD É., BARONI M., BRACONNOT P., CAO J., CHINI L.P., EGOROVA T., EVANS M., GONZÁLEZ-ROUCO J.F., GOOSSE H., HURTT G.C., JOOS F., KAPLAN J.O., KHODRI M., KLEIN GOLDEWIJK K., KRIVOVA N., LEGRANDE A.N., LORENZ S.J., LUTERBACHER J., MAN W., MEINSHAUSEN M., MOBERG A., NEHRBASS-AHLES C., OTTO-BLIESNER B.I., PHIPPS S.J., PONGRATZ J., ROZANOV E., SCHMIDT G.A., SCHMIDT H., SCHMUTZ W., SCHURER A., SHAPIRO A.I., SIGL M., SMERDON J.E., SOLANKI S.K., TIMMRECK C., TOOHEY M., USOSKIN I.G., WAGNER S., WU C.-Y., YEO K.L., ZANCHETTIN D., ZHANG Q. et ZORITA E., « The PMIP4 contribution to CMIP6 - Part 3: the last millennium,

- scientific objective and experimental design for the PMP4 *past1000* simulations », *Geoscientific Model Development Discussions*, 2016, p. 1-34, DOI : 10.5194/gmd-2016-278.
- BONVALOT L., TUNA T., FAGAULT Y., JAFFREZO J.-L., JACOB V., CHEVRIER F. et BARD É., « Estimating contributions from biomass burning, fossil fuel combustion, and biogenic carbon to carbonaceous aerosols in the Valley of Chamonix: a dual approach based on radiocarbon and levoglucosan », *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 16, 2016, p. 1-20, DOI : 10.5194/acp-16-13753-2016.
- SHUMILOVSKIKH L.S., HOPPER K., DJAMALI M., PONEI P., DEMORY F., ROSTEK F., TACHIKAWA K., BITTMANN F., GOLYEVA A., GUIBAL F., TALON B., WANG L.-C., NEZAMABADI M., BARD É., LAHIJANI H., NOKANDEH J., OMRANI REKAVANDI H., DE BEAULIEU J.-L., SAUER E. et ANDRIEU-PONEI V., « Landscape evolution and agro-sylvo-pastoral activities on the Gorgan Plain (NE Iran) in the last 6000 years », *The Holocene*, vol. 26, n° 10, 2016, p. 1676-1691, DOI : 10.1177/0959683616646841.
- DAVTIAN N., MÉNOT G., BARD É., POULENARD J. et PODWOJEWSKI P., « Consideration of soil types for the calibration of molecular proxies for soil pH and temperature using global soil datasets and Vietnamese soil profiles », *Organic Geochemistry*, vol. 101, 2016, p. 140-153, DOI : 10.1016/j.orggeochem.2016.09.002.
- CHASSIOT L., CHAPRON E., DI GIOVANNI C., LAJEUNESSE P., TACHIKAWA K., GARCIA M. et BARD É., « Historical seismicity of the Mont Dore volcanic province (Auvergne, France) unraveled by a regional lacustrine investigation: New insights about lake sensitivity to earthquakes », *Sedimentary Geology*, vol. 339, 2016, p. 134-150, DOI : 10.1016/j.sedgeo.2016.04.007.
- CLARK P.U., SHAKUN J.D., MARCOTT S.A., MIX A.C., EBY M., KULP S., LEVERMANN A., MILNE G.A., PFISTER P.L., SANTER B.D., SCHRAG D.P., SOLOMON S., STOCKER T.F., STRAUSS B.H., WEAVER A.J., WINKELMANN R., ARCHER D., BARD É., GOLDNER A., LAMBECK K., PIERREHUMBERT R.T. et PLATTNER G.-K., « Consequences of twenty-first-century policy for multi-millennial climate and sea-level change », *Nature Climate Change*, vol. 6, n° 4, 2016, p. 360-369, DOI : 10.1038/nclimate2923.
- DARFEUIL S., MÉNOT G., GIRAUD X., ROSTEK F., TACHIKAWA K., GARCIA M. et BARD É., « Sea surface temperature reconstructions over the last 70 kyr off Portugal: Biomarker data and regional modeling: Biomarkers and Modeling as SST Proxies », *Paleoceanography*, vol. 31, n° 1, 2016, p. 40-65, DOI : 10.1002/2015PA002831.
- VIDAL L., RHOUIJATI A., ADALLAL R., JOUVE G., BARD E., BENKADDOUR A., CHAPRON E., COURP T., DEZILEAU L., GARCIA M., HEBERT B., SIMONNEAU A., SONZOGNI C., SYLVESTRE F., KAZUYO T., VALLET-COULOMB C. et VIRY E., « Past hydrological variability in the Moroccan Middle Atlas inferred from lakes and lacustrine sediments », *The Mediterranean region under climate change: A scientific update*, Marseille, IRD éditions, 2016, p. 57-69, <https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-01394690/document>.

