

Sciences : peut-on réparer le climat ?

■ **RAPPEL DES FAITS**
Stocker les gaz à effet de serre six pieds sous terre ? Réfléchir les rayons solaires à l'aide de parapluies spatiaux ? Refroidir l'atmosphère en y insufflant des milliards de particules de soufre ?

Autant de solutions avancées par l'ingénierie climatique – ou géo-ingénierie –, projet scientifique visant à contrecarrer le changement climatique grâce à des solutions techniques. Le principe n'est pas sans provoquer des controverses. À commencer par l'idée que de tels projets signifieraient renoncer à limiter nos émissions de CO₂. Le 25 juin, l'Académie des sciences organisait un séminaire sur le sujet. (1).

MARIE-NOËLLE BERTRAND

(1) Vidéos en ligne sur <http://www.academie-sciences.fr>
Outre les trois chercheurs présents dans ces pages, Olivier Boucher, du Laboratoire de météorologie dynamique, Stéphane Blain, de l'Observatoire océanologique de Banyuls-sur-Mer, et Philippe Ciais, du Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement, sont aussi intervenus.

Fertilisation des océans : Le risque d'effets secondaires pernicieux n'est pas exclu

PAR JEAN-CLAUDE DUPLESSY, DIRECTEUR DE RECHERCHE ÉMÉRITE AU CNRS, SPÉCIALISTE DU FONCTIONNEMENT DES OCÉANS.

En dépit des bonnes intentions affichées dans le protocole de Kyoto, les émissions de CO₂ par les activités humaines ont augmenté de 40 % depuis vingt ans et dépassent aujourd'hui 36 milliards de tonnes par an. L'augmentation de la teneur en CO₂ de l'air accroît l'effet de serre et contribue à réchauffer les basses couches de l'atmosphère. Le CO₂ passe également dans la mer (environ un quart des émissions) et acidifie l'océan, menaçant la survie des espèces à coquille ou squelette calcaire.

Devant la difficulté de réduire les émissions, des scientifiques ont proposé d'augmenter l'absorption du CO₂ que les algues et les arbres réalisent naturellement en fabriquant leur matière organique par photosynthèse.

Dans l'océan, le phytoplancton se développe essentiellement au printemps en consommant les élé-

ments nutritifs disponibles dans la couche d'eau superficielle, éclairée par le rayonnement solaire. La floraison s'arrête quand les nutritifs sont épuisés. Les biologistes ont toutefois remarqué que de grands bassins océaniques comme l'océan Austral, qui entoure l'Antarctique, ne développent que des quantités minimes de plancton. Beaucoup de phosphates et de nitrates restent disponibles.

de fer solubles dans l'océan pour renforcer la production de matière organique par le plancton et accroître artificiellement l'absorption de CO₂ par l'océan.

Déjà les Canadiens, hors de tout contrôle scientifique, envisagent de fertiliser leurs eaux côtières pour favoriser la pêche des saumons. Plusieurs expériences scientifiques ont été menées en conditions contrôlées, mais elles ont calmé l'enthousiasme

des algues opportunistes qui profitent de l'aubaine, et certaines sécrètent des toxines, d'autres relâchent de l'oxyde d'azote qui est un gaz à effet de serre plus puissant que le CO₂. En outre, les océanographes font remarquer que les sels qui ne sont pas utilisés sont transportés par les courants marins et utilisés dans des zones où le fer est disponible. Le risque d'effets secondaires pernicieux n'est pas exclu. Une réflexion internationale est en cours pour fournir des recommandations avant que des pêcheries industrielles ne lancent des actions irréfléchies, dommageables pour le milieu marin.

Les géochimistes se sont aussi tournés vers les continents actuellement victimes d'un déboisement intense mais sur lesquels des actions de reforestation sont menées avec succès. La biomasse des forêts européennes a doublé depuis cinquante ans en raison de leur gestion raisonnée. Des forêts en croissance constituent donc un réservoir dans lequel est stocké du carbone extrait de l'atmosphère. Combien de temps va durer ce stockage qui a mis plusieurs dizaines d'années à se créer ? Si le bois est utilisé comme combustible, le bilan net est très vite nul. Si ce même bois sert à construire des maisons ou des meubles, alors le carbone peut être stocké pendant de nouvelles décennies.

Pour ôter plus de CO₂ atmosphérique que la biosphère ne le fait naturellement, il faut soit la fertiliser, soit augmenter le temps pendant lequel le carbone est bloqué dans le réservoir. Les apports d'engrais coûtent de l'énergie ; ils sont émetteurs de CO₂. Les études en cours montrent que le stockage de CO₂ en gérant la biosphère est possible mais avec une efficacité limitée et des risques d'effets secondaires sur le climat, une forêt modifiant le pouvoir réflecteur des sols.

L'efficacité des procédés reposant sur une fertilisation de la biosphère, continentale ou marine, paraît bien modeste devant l'ampleur des quantités de CO₂ émis par les activités humaines. Des effets secondaires sont à craindre. Des études approfondies sont donc indispensables avant de décider d'un quelconque programme d'ingénierie biosphérique.

« Déjà les Canadiens, hors de tout contrôle scientifique, envisagent de fertiliser leurs eaux côtières pour favoriser la pêche des saumons. »

Qu'est-ce qui empêche leur utilisation par les algues microscopiques ? Le géochimiste américain John Martin a démontré que c'est la carence en fer des eaux de surface qui limite la production planctonique. Ainsi naquit l'idée de déverser des sels

des apprentis sorciers. La fertilisation des eaux superficielles est réelle mais modeste et la quantité de carbone entraînée en profondeur et stockée dans le sédiment (la seule permettant d'extraire le CO₂ pendant longtemps) très faible. Les effets secondaires ne



Nusa Dua est située dans le sud de l'île de Bali, qui se trouve à environ 40 kilomètres au sud de Denpasar, la capitale de la province de Bali sur laquelle on cultive des algues. Cette localité est le lieu où s'est tenue en décembre 2007 la conférence de Bali consacrée aux problèmes des changements climatiques mondiaux.

Stockage du CO₂ : Une solution pour permettre l'utilisation non polluante des énergies fossiles

PAR OLIVIER VINCKÉ, CHEF DU DÉPARTEMENT GÉOPHYSIQUE-GÉOMÉCANIQUE DE L'INSTITUT FRANÇAIS DU PÉTROLE ÉNERGIES NOUVELLES.

Tout le monde s'accorde à dire que les activités humaines perturbent le cycle du carbone de notre planète. Jusqu'à la révolution industrielle, cet échange naturel entre la géosphère, la biosphère, les océans et l'atmosphère a permis de maintenir une concentration modérée en CO₂ dans l'atmosphère autour de 0,028 %. Aujourd'hui, l'utilisation intensive des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz) a fait grimper cette valeur, autour de 0,04 %, et se traduit par un dérèglement climatique.

Malgré les efforts réalisés pour recourir à des sources d'énergie moins émettrices de CO₂ (éolien, nucléaire...), notre société dépend fortement des énergies fossiles, notamment tout le secteur industriel à forte consommation énergétique, et aucune solution unique ne permet de réduire les émissions de CO₂ de façon satisfaisante. Des solutions à court terme sont donc nécessaires pour permettre l'utilisation non polluante de cette source énergétique. En plus des améliorations d'efficacité énergétique, des scientifiques ont proposé de capter le CO₂ dans les fumées des usines et de le stocker de façon permanente dans des couches profondes du sous-sol pour l'isoler

de l'atmosphère. Cette idée n'a rien d'extraordinaire : il existe, dans le monde, des réservoirs de CO₂ naturel âgés de plusieurs dizaines de millions d'années, qui prouvent la faisabilité de l'approche.

Le CO₂ capté peut être stocké dans des aquifères salins profonds (capacité de stockage importante mais peu investiguée), dans des réservoirs pétroliers déjà exploités (associés ou non à des techniques de récupération assistée du pétrole), bien connus grâce

« Il existe, dans le monde, des réservoirs de CO₂ naturel âgés de plusieurs dizaines de millions d'années, qui prouvent la faisabilité de l'approche. »

à l'exploration et à la production pétrolière, ou dans des veines de charbon non exploitées. Ces réservoirs doivent être constitués de roches permettant de stocker de grandes quantités de CO₂, de l'injecter facilement, mais aussi d'une couche écran imperméable (couverture) pour éviter que le CO₂ ne remonte vers la surface. Le CO₂ sera injecté à grande profondeur afin qu'il occupe un volume minimal. On choisira ainsi des profondeurs supérieures à 750 mètres et des températures supérieures à 32 °C. Ceci évitera, par ailleurs, tout

conflit d'usage avec d'autres utilisations du sous-sol.

Le CO₂ injecté dans le réservoir remontera jusqu'à la base de la couverture, remplissant les pores de la roche du réservoir. Au cours du temps, une partie se dissoudra dans la saumure et se transformera en minéraux. L'injection de CO₂ se traduira par une augmentation de pression qui se dissipera au cours du temps. Ces phénomènes rendent le stockage de plus en plus sécurisé au fil du temps.

La caractérisation du site et la modélisation de son comportement profitent de toute l'expérience acquise dans le domaine pétrolier. Elles reposent sur l'élaboration de modèles à différentes échelles (de l'échelle du bassin à l'échelle du pore de la roche en passant par l'échelle du réservoir) dans lesquels est simulée l'injection de CO₂ en prenant en compte les différents phénomènes physiques qui entrent en jeu.

La surveillance du site démarrera avant l'injection de façon à fournir des données de référence. Elle per-

mettra de comparer les mesures aux simulations, d'enrichir les modèles par l'introduction de nouvelles informations et, si besoin, de les remettre à jour. Elle permettra aussi de surveiller les zones sensibles et éventuellement de mettre en place des techniques de remédiation.

Un cadre législatif existe en Europe. Il vise à garantir la sécurité, maîtriser les impacts, identifier les responsabilités et lever les barrières législatives existantes.

Les actions de communication vers le public doivent être menées en toute transparence et dès le démarrage du projet. La population, peu informée sur le captage et le stockage géologique du CO₂, exprime sa méfiance envers les politiques et les industriels. Appréhendant des risques éventuels et craignant un impact sur le prix de l'énergie, elle reste difficile à convaincre, même si elle perçoit les intérêts économiques (création d'emplois) et environnementaux.

Des pilotes de stockage existent déjà, notamment en Europe, aux États-Unis et en Australie, mais un déploiement à l'échelle industrielle nécessite de concilier les aspects législatifs, l'acceptation sociale, les aspects économiques, via notamment la mise en place de mesures incitatives.

L'idée que l'on pourrait maîtriser le système climatique est à ce stade un mythe dangereux

PAR HERVÉ LE TREUT, CLIMATOLOGUE, DIRECTEUR DE RECHERCHE AU CNRS, PARTICIPE AUX TRAVAUX DU GIEC.

Les techniques de géo-ingénierie « actives », qui impliquent une action directe sur le système climatique, tirent une partie de la fascination qu'elles inspirent d'une vision trop simplifiée de ce que sont les enjeux climatiques.

Depuis plusieurs décennies, la communauté scientifique a tiré la sonnette d'alarme sur les risques induits par les gaz à effet de serre. Elle a accompagné cette alerte d'un travail approfondi, qui a permis de préciser les ordres de grandeur du réchauffement attendu et ses contours géographiques généraux : des températures augmentant plus fortement aux hautes latitudes (surtout en Arctique) ou sur les continents, s'accompagnant d'un refroidissement de la stratosphère et de conséquences très directes portant, par exemple, sur l'extension de la banquise Arctique ou sur la fonte partielle du Groenland. La similitude tout à fait remarquable entre ces changements attendus, issus pour l'essentiel de calculs réalisés dès les années soixante-dix, et les grands contours de l'évolution observée du climat depuis la seconde Guerre mondiale, indique avec une haute probabilité que nous sommes déjà face aux premières manifestations d'un changement lié aux activités humaines. Mais savoir faire ce diagnostic ne veut pas dire que nous soyons en mesure de quantifier précisément les effets des changements à venir, encore moins aux échelles locales ou régionales. Il y a loin de l'étude de risque à la capacité de prévoir les choses en détail.

Un premier coupable est facilement identifiable : il s'agit de la circulation atmosphérique, qui sera

immédiatement modifiée par tout changement climatique. Un chauffage plus marqué en surface modifie le transport vertical de vapeur d'eau et la formation des nuages, en particulier des nuages convectifs, tous facteurs susceptibles d'amplifier ou d'atténuer le réchauffement de la planète. La communauté scientifique lutte depuis des décennies pour affiner la quantification de ces processus, mais ne sait pas encore jusqu'où elle pourra avancer.

Les modulations de la distribution géographique du chauffage posent un problème peut-être plus difficile encore. Le climat de la planète met en jeu des structures de grande échelle, dont chacune a sa dynamique propre, et qui agissent les unes sur les

« La communauté scientifique lutte depuis des décennies pour affiner la quantification de ces processus, mais ne sait pas encore jusqu'où elle pourra avancer. »

autres. À nos latitudes par exemple, les variations de l'anticyclone des Açores ou de la dépression d'Islande règlent l'évolution d'une oscillation Nord Atlantique. Dans les zones tropicales, les différentes moussons, des processus comme El Niño sont eux aussi sujets à des fluctuations aux impacts extrêmement importants. On ne sait pas si la manière dont tous ces éléments entrent en compétition ou collaborent pour répondre au chauffage climatique est vraiment prévisible. Mais pour l'instant les

différents modèles de la communauté donnent des résultats souvent très différents.

Ces incertitudes ont un nom qu'on leur donne trop rarement : ce sont des risques, des risques qui vont bousculer de manière imprévue les régimes de précipitations, les phases de sécheresse, les impacts agricoles. Au moment où l'on se rend compte que les émissions de gaz à effet de serre n'ont jamais augmenté de manière aussi rapide, ces risques constituent aussi une source importante de difficultés pour la mise en place de politiques d'adaptation, pour la gestion des « fonds verts » discutés lors des derniers sommets environnementaux. L'ampleur de ces risques tend par ailleurs à croître chaque fois que l'on prend en compte de nouvelles composantes du système climatique : océans, glaciers, végétation...

Il n'y a aucune raison de penser que les méthodes actives de géo-ingénierie ne se heurteront pas à des risques similaires. L'idée que le système climatique est un système maîtrisable et qu'il est possible de contrôler les modifications qu'on lui apporterait est à ce stade un mythe dangereux, le mythe d'une solution simple qui nous allégerait d'un coup de tous nos problèmes. Nous sommes au contraire confrontés à une situation d'une immense complexité, à un système climatique qui évolue sous l'effet de contraintes multiples (démographie, accès aux ressources en énergie, en eau potable, en alimentation, préservation de la biodiversité...). Le chemin risque d'être étroit, fait de compromis difficiles. Il ne faut pas s'en détourner pour des raisons illusives.

LA REVUE DE PRESSE

Libération SYLVESTRE HUET,

SUR SON BLOG {SCIENCES²}, AVRIL 2013.

« Riche à milliards (...), Bill Gates fait partie des "philanthropes" ne sachant que faire de leur argent. Il vient d'en trouver un usage : subventionner des initiatives soutenant la "géo-ingénierie climatique". C'est ainsi que, dans quelques mois, un ballon installé dans la haute atmosphère au-dessus de Fort Sumner (Nouveau-Mexique, États-Unis) devrait y injecter des particules sulfurées censées réfléchir la lumière solaire et ainsi refroidir la Terre (...). D'autres richissimes autoproclamés "visionnaires" emboîtent le pas de la géo-ingénierie climatique. Sir Richard Branson est aussi de la partie. »

bastal SOPHIE CHAPPELLE,

SEPTEMBRE 2011

« La fin inévitable du gisement (de Lacq) est prévue pour 2013. (...) La fin ? Pas tout à fait. Car Total mène une ultime expérimentation : le captage et stockage du CO₂. (...) Cette technologie est expérimentée au nom de la lutte contre le réchauffement climatique, assure Total. (...) La promesse s'accompagne cependant d'une perspective bien plus attrayante. La captation et la séquestration du CO₂ représenteraient "quelque 600 milliards d'euros à l'horizon 2030", selon Valérie Létard, ex-secrétaire d'État auprès du ministre de l'Écologie. »

LE MOT

● GÉO-INGÉNIERIE

Il est de ces mots qui provoquent des débats passionnés. Ses promoteurs y lisent une opportunité d'endiguer le réchauffement climatique en y apportant des solutions techniques. Ses opposants dénoncent une manipulation potentiellement dangereuse, exemptant l'industrie mondiale de transformer ses modes de production. Les prochaines conférences climatiques, dont celle de 2015 qui se tiendra à Paris, devraient relancer le débat.

LE CHIFFRE

12

C'est, en milliers de milliards, le nombre présumé de tonnes de CO₂ qu'il serait possible de stocker mondialement dans les nappes aquifères, les anciennes mines ou encore les roches poreuses...