

pouvons estimer que la galaxie abrite des dizaines de millions de ces systèmes planétaires circumbinaires. En outre, toutes les planètes circumbinaires découvertes à ce jour sont des géantes gazeuses. La recherche de planètes rocheuses plus petites et légères se poursuit, mais des planètes circumbinaires de la taille de la Terre sont extrêmement difficiles à détecter.

Les positions des orbites des planètes soulèvent de nombreuses questions. Elles ont tendance à être très proches des étoiles. Si elles l'étaient davantage, les orbites des planètes seraient instables. En cherchant pourquoi les planètes circumbinaires tournent si près de leur rayon critique d'instabilité, nous améliorerons les théories décrivant la formation de ces planètes et l'évolution de leur orbite dans le temps.

Même si nous ignorons pourquoi ces planètes circulent sur des orbites aussi instables, cet état de fait suggère que des planètes peuvent se former et perdurer dans un environnement chaotique.

La tendance des planètes circumbinaires de *Kepler* à se trouver près du rayon critique de stabilité a une conséquence intéressante. Pour ces étoiles, le rayon critique est souvent proche de la zone habitable, c'est-à-dire la région où l'énergie produite par les étoiles rend la température de la planète juste assez

CES PLANÈTES CIRCULENT sur des orbites instables, ce qui suggère que des planètes peuvent se former et perdurer dans un environnement chaotique.

chaude pour que de l'eau se maintienne à l'état liquide. Trop près de l'étoile, l'eau de la planète s'évapore ; trop loin, l'eau gèle. Et l'eau liquide est une condition indispensable à la vie telle que nous la connaissons.

Pour une étoile unique, la zone habitable est une région en forme de coquille sphérique autour de l'étoile. Dans un système binaire, chaque étoile a sa propre

zone habitable, et ces zones fusionnent en un sphéroïde déformé si les étoiles sont suffisamment proches. La zone habitable combinée se déplace en suivant la rotation des étoiles binaires. Ainsi, contrairement à la Terre qui décrit une orbite quasi circulaire autour du Soleil, la distance d'une planète circumbinaire à chacun de ses hôtes peut changer de façon importante au cours de l'année orbitale de la planète. Par conséquent, les saisons planétaires pourraient durer quelques semaines seulement, au gré des ballets des étoiles l'une autour de l'autre.

Deux des sept planètes circumbinaires à transits sont dans la zone habitable de leur système, une proportion très élevée. Toutefois, être dans la zone habitable ne garantit pas des conditions favorables à la vie. Par exemple, toutes les planètes découvertes sont gazeuses. Et avec des variations de saisons rapides et marquées, à quoi pourrait bien ressembler la vie dans un monde circumbinaire ? ■

POUR LA

COLLECTION SCIENCE LES PETITS THEMATIQUES

Des feuilleteables numériques fiables et pratiques sur l'actualité scientifique

Accédez facilement à l'essentiel sur un thème marquant de l'actualité scientifique grâce à :

- une sélection d'articles de référence parus dans *Pour la Science* et *Cerveau & Psycho*
- compilée dans un feuilleteable numérique de 35 pages environ
- téléchargeable en format PDF au prix de 3,99€ (compatible avec ordinateur et tablette).

Des dizaines de sujets à découvrir sur www.pourlascience.fr/petits-thematiques

Enterrer le carbone en déterrant du méthane ?

Du dioxyde de carbone pourrait être massivement stocké dans certains aquifères salins profonds, notamment dans le golfe du Mexique. L'exploitation du méthane contenu dans ces saumures et de leur chaleur assurerait la rentabilité de cette méthode.

Steven Bryant

Mark Twain, dit-on, observait que tout le monde se plaint du temps qu'il fait, mais que personne ne fait rien à son sujet. On pourrait transposer sa remarque au changement climatique, contre lequel les mesures sérieuses manquent. L'aspect économique l'explique en grande partie. Réduire l'accumulation de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère – le moteur principal, d'origine humaine, du changement climatique – est coûteux. Cela nécessite soit un changement de politique énergétique, avec la fin de la prépondérance du charbon et du pétrole, soit une technologie complexe pour capturer le CO₂ émis et le confiner pendant des siècles (on parle de séquestration).

Et si nous pouvions à la fois produire de grandes quantités d'énergie et enterrer

les gaz à effet de serre grâce à une méthode rentable et compatible avec l'infrastructure industrielle existante ? Ce scénario pourrait devenir réalité en plusieurs endroits du monde, notamment le long de la côte du golfe, au Sud-Est des États-Unis. Grâce à la configuration géologique particulière de cette région, une énorme quantité de CO₂ pourrait être stockée à plusieurs kilomètres de profondeur. Le gaz serait injecté dans des saumures, des fluides chauds et salés que l'on remonterait à la surface avant de les renvoyer dans le sous-sol. Au passage, on y prélèverait du méthane (le principal composant du gaz naturel) et de la chaleur. Les techniques employées seraient dérivées de celles utilisées pour l'extraction du pétrole et du gaz. Pris isolément, ni le stockage ni la production de méthane ou

d'énergie géothermique ne sont économiquement viables, mais ils le deviennent quand on les combine.

Les énormes quantités de CO₂ émises par les activités humaines ne peuvent être stockées dans un réservoir classique et l'unique endroit assez grand est le sous-sol. Dans la couche supérieure de la croûte terrestre, sur une épaisseur de quelques kilomètres, les pores des roches sédimentaires pourraient contenir des siècles d'émissions. Pour réduire de 15 pour cent la quantité de CO₂ envoyée dans l'atmosphère par les États-Unis, il faudrait en séquestrer jusqu'à une gigatonne chaque année. Environ quatre gigatonnes de pétrole brut et deux gigatonnes de gaz naturel sont extraites par an dans le monde. Ces ordres de grandeur suggèrent que la séquestration

L'ESSENTIEL

■ Le coût de la capture et du stockage du dioxyde de carbone (CO_2) est souvent rédhibitoire.

■ Pour y remédier, on envisage d'amener en surface de l'eau salée (ou saumure) chaude et riche en méthane, abondante dans certains sous-sols. Du CO_2 y serait dissous, tandis que du méthane et de l'énergie géothermique en seraient extraits.

■ La saumure chargée en CO_2 serait ensuite renvoyée dans les profondeurs pour être stockée de façon permanente.

migrer jusqu'à la surface. À l'origine, la plupart des prospecteurs foraient là où ils repéraient un suintement.

Plusieurs études ont montré que de nombreuses structures géologiques du sous-sol peuvent bloquer l'ascension du CO_2 , mais que le gaz risquerait tout de même de remonter par divers conduits naturels. Cependant, une propriété intéressante du CO_2 pourrait être exploitée. La plupart des liquides deviennent moins denses quand du gaz s'y dissout, mais le contraire se produit lorsque du CO_2 se dissout dans l'eau. En profondeur, l'eau liquide est principalement présente sous forme de saumure et celle-ci est plus dense quand elle contient du dioxyde de carbone. La saumure chargée en CO_2 tend alors à couler, ce qui l'éloigne de la surface et augmente la fiabilité du stockage.

Cependant, dans les conditions de température et de pression régnant dans les profondeurs, le CO_2 met du temps à se dissoudre dans la saumure. Mon étudiant Mac Burton et moi avons envisagé une solution radicale : forer un puits jusqu'à la saumure pour la faire remonter à la surface, où du CO_2 y serait injecté sous pression (sa dissolution serait alors plus rapide), avant de la renvoyer dans le sous-sol.

Une telle méthode nécessiterait beaucoup d'énergie. En outre, il faudrait remonter de grandes quantités de saumure, car elle retient assez peu de CO_2 par unité de masse.

Des techniques bien maîtrisées par l'industrie pétrolière

Ce second point ne semble pas problématique : les compagnies pétrolières ont l'habitude de gérer des quantités de fluides équivalentes. Pour exploiter un réservoir, elles forent des puits régulièrement espacés et injectent par certains d'entre eux de l'eau ou de la saumure, qui pousse le pétrole vers le haut ; ce dernier est alors récupéré par les autres puits. Aujourd'hui, une dizaine de gigatonnes de saumure sont ainsi injectées chaque année dans les réservoirs (la plupart du temps, cette saumure provient elle-même du sous-sol). Nous devrions donc parvenir à gérer les flux de saumure nécessaires à un stockage de CO_2 significatif. Certains puits extrairaient de la saumure et d'autres la renverraient

dans le sous-sol avec un chargement de CO_2 dissous.

En revanche, les investissements nécessaires et les coûts d'exploitation sont plus difficiles à assurer. Dans la plupart des pays, les entreprises qui émettent du CO_2 ne paient rien en retour, de sorte qu'elles n'ont aucune incitation économique à séquestrer le carbone. Gary Pope, qui enseigne l'ingénierie du pétrole à l'Université du Texas, a alors eu l'idée d'exploiter le méthane des saumures, susceptible d'être brûlé dans des centrales thermiques locales ou distribué dans des gazoducs.

Comme toutes les régions pétrolières, le golfe du Mexique possède de profonds aquifères salins riches en méthane dissous. Ce gaz pourrait être extrait de la saumure lorsqu'elle atteint la surface et remplacé par du CO_2 . Combinée avec la production de chaleur géothermique, l'exploitation du méthane suffirait-elle à couvrir le coût de fonctionnement de l'installation ? Avec G. Pope, nous avons engagé un doctorant, Reza Ganjdanesh, pour le déterminer.

Plus d'énergie extraite que consommée

Dans un forage conventionnel, la saumure qui remonte dans un puits chute en pression et relargue une partie de son méthane. Y dissoudre du CO_2 force encore plus de méthane à sortir. En outre, le long des côtes du Texas et de la Louisiane, de nombreux aquifères sont situés à une profondeur supérieure à trois kilomètres et ont une forte pression interne, si bien que la quantité d'énergie nécessaire pour amener la saumure à la surface est faible, voire nulle.

Ces aquifères sont aussi assez chauds pour que la saumure constitue une source notable d'énergie géothermique (sa température y dépasse 150°C). R. Ganjdanesh a montré que l'extraction de méthane et de chaleur, combinée avec la dissolution de CO_2 dans le fluide, a un solde énergétique positif : le méthane et la chaleur représentent plus d'énergie que ce qui est consommé. Le dispositif pourrait donc être économiquement attractif, même quand le droit d'émettre du carbone ne coûte rien.

Le méthane des saumures risque de toute façon de devoir être exploité un jour. Des décennies durant, on a foré dans les gisements les plus accessibles, les plus faciles à exploiter et où le combustible était le plus concentré. Mais aujourd'hui, ces

d'une gigatonne de CO_2 compressé pourrait être réalisable, mais avec un effort conséquent. Bien sûr, le stockage de CO_2 peut s'accompagner d'autres mesures, telles que l'amélioration de l'efficacité énergétique et le passage à des carburants non fossiles, qui réduiraient les émissions à la source.

La difficulté est que le dioxyde de carbone tend à remonter vers la surface à travers des fissures et des pores, pour finir par s'échapper dans l'atmosphère, à moins qu'il ne rencontre un « joint étanche » sur son trajet – une couche rocheuse dont les pores sont si minuscules que le gaz ne peut s'y infiltrer. L'industrie pétrolière bénéficie de flux ascensionnels similaires. Le pétrole et le gaz arrivent dans les réservoirs du sous-sol à partir de roches encore plus profondes, et une partie continue de

gisements s'épuisent et l'ère du pétrole et du gaz « faciles » est révolue. La demande continuant de croître, les exploitants se tournent vers des formes moins accessibles de carburants fossiles.

Au cours des cinq dernières années, l'augmentation de la production américaine de pétrole et de gaz a surtout résulté de la fracturation hydraulique de schistes profonds. Les combustibles y sont moins concentrés que dans les gisements traditionnels, leur récupération est lente et difficile, et pose des problèmes environnementaux, mais ils sont présents en quantités considérables. En 2012, les États-Unis ont extrait quelque 255 milliards de mètres cubes de gaz de schiste, d'une valeur de 25 milliards de dollars (18,5 milliards d'euros).

Le méthane dissous dans la saumure pourrait être encore plus abondant, malgré une concentration cinq fois plus faible que dans les schistes. Il représentera sans doute la prochaine réserve exploitée. Pour la côte du golfe uniquement, il y aurait de l'ordre de un million de milliards de mètres cubes de méthane. Pour comparaison, les États-Unis ont consommé au cours des dernières décennies entre 560 et 710 milliards de mètres cubes de gaz naturel par an.

L'immensité des réserves de gaz dissous dans les saumures a poussé le Département de l'énergie américain à effectuer quelques tests dans les années 1970 et 1980. Des puits ont été creusés et de la saumure a été remontée à la surface, mais les coûts n'étaient pas compétitifs.

Chauffer grâce à l'énergie géothermique

Ce n'est toujours pas le cas, mais la production combinée d'énergie géothermique pourrait changer la donne. Sur une échelle de temps humaine, la chaleur interne de la Terre durera indéfiniment. Son exploitation requiert des puits d'injection et d'extraction, techniques déjà disponibles et utilisées pour d'autres ressources du sous-sol. La principale raison pour laquelle l'énergie géothermique véhiculée par la saumure n'est pas plus exploitée est qu'elle est peu dense : à volume équivalent, la saumure contient beaucoup moins d'énergie que celle obtenue en brûlant du charbon, du pétrole ou du gaz (le rapport est d'environ deux ordres de grandeur).

Cependant, cette faible densité énergétique n'est pas problématique pour

■ L'AUTEUR



Steven BRYANT est professeur d'ingénierie du pétrole et des systèmes géologiques à l'Université du Texas, à Austin, aux États-Unis.

■ SUR LE WEB

Plus d'information sur les coûts : ScientificAmerican.com/nov2013/bryant

Quelques chiffres

Le stockage d'une gigatonne de CO₂ par an :

- nécessiterait l'extraction et l'injection de plus de 63 millions de mètres cubes de saumure par jour.
- produirait plus de 110 milliards de mètres cubes de gaz naturel par an, soit un sixième de la consommation américaine.
- fournirait entre 20 et 200 gigawatts de chaleur d'origine géothermique, selon les applications.

certaines applications. Le chauffage et la climatisation, ainsi que la production d'eau chaude, représentent une part importante de l'énergie que nous consommons (près de dix pour cent aux États-Unis, selon le Département de l'énergie). Ces usages pourraient être assurés par la géothermie à basse ou moyenne énergie. En Europe, des pompes à chaleur fonctionnant sur ce principe sont exploitées avec succès depuis de nombreuses années.

Une région idéale au Sud-Est des États-Unis

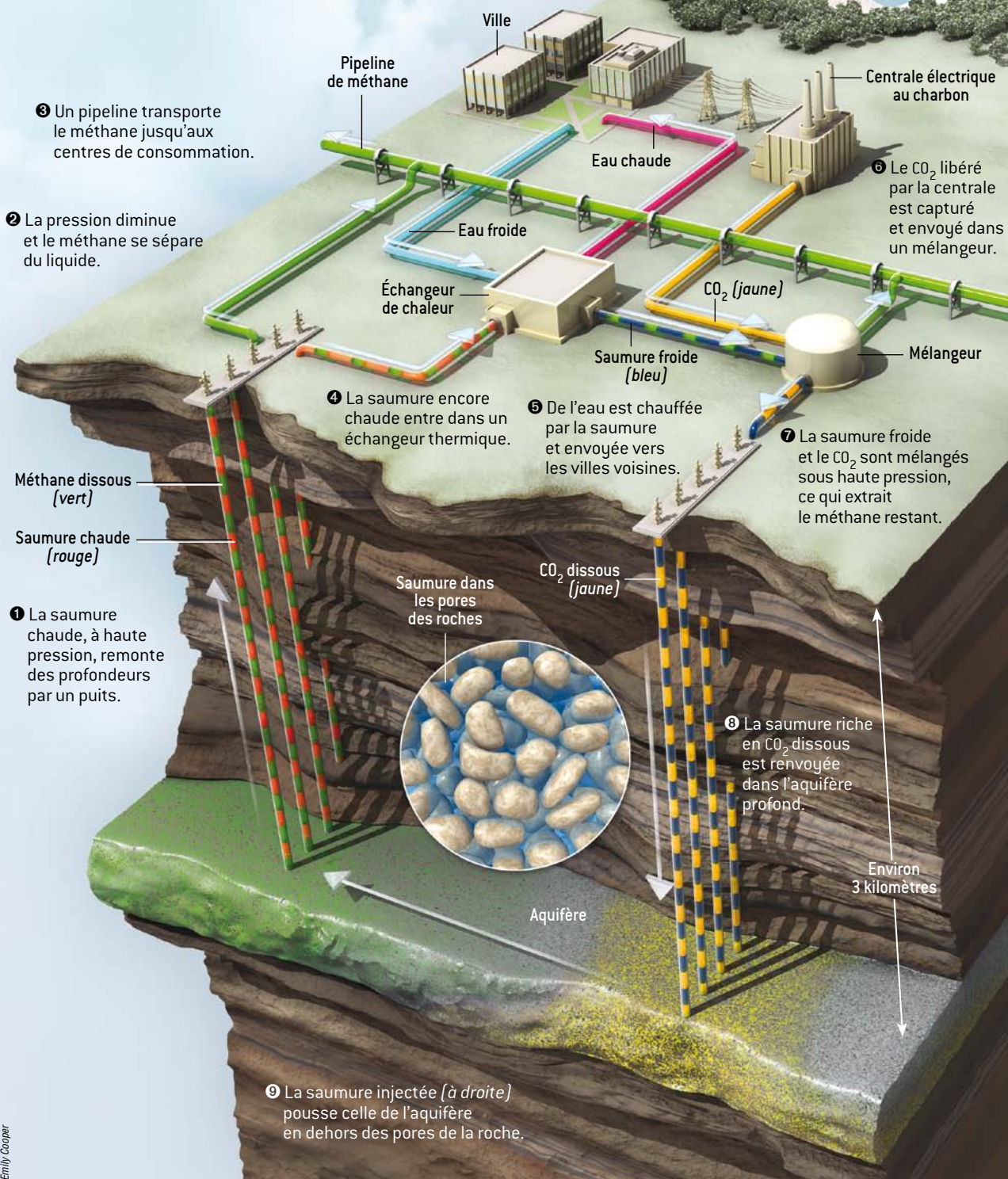
Les dispositifs qui combinent le stockage du CO₂ avec l'extraction du méthane et de la chaleur des saumures séquestreraient-ils assez de gaz pour réduire de façon notable la quantité émise dans l'atmosphère ? Nous l'avons récemment étudié pour la côte du golfe, qui abrite de nombreuses centrales à combustibles fossiles et des industries très émettrices de CO₂.

Du gaz pourrait aussi y être acheminé depuis des sources distantes. La construction des pipelines nécessaires est réalisable, même si elle impliquerait des investissements importants. Ainsi, dans les années 1980, les industriels ont construit plus de 3 400 kilomètres de pipelines dans l'Ouest du Texas pour apporter le CO₂ de réservoirs souterrains naturels à des gisements de pétrole, où il sert à augmenter la quantité de pétrole récupérée. Là encore, la région de la côte du golfe est l'endroit idéal pour le dispositif combiné : outre ses énormes réservoirs de saumure et sa population importante (qui constitue un débouché potentiel pour l'énergie géothermique), elle a une infrastructure de pipelines développée, qui alimente le reste du pays en gaz naturel.

Stocker une gigatonne de CO₂ par an, soit un sixième des émissions actuelles des États-Unis, nécessiterait l'extraction et l'injection de plus de 63 millions de mètres cubes de saumure par jour. Ce débit est élevé, mais pas insurmontable : on pourrait l'obtenir avec environ 100 000 puits (à titre de comparaison, plus d'un million de puits ont été forés au Texas pour le pétrole et le gaz). Il faudra de nombreuses années pour les creuser, mais la réalisation de tout autre dispositif évitant l'émission d'une gigatonne de CO₂ par an prendrait un temps similaire. Si l'on remplaçait des centrales au charbon par des centrales nucléaires, par exemple,

ENTERRER LE DIOXYDE DE CARBONE EN PRODUISANT DE L'ÉNERGIE

Le stockage de CO_2 dans le sous-sol pourrait limiter le réchauffement climatique, mais les procédés actuels sont coûteux. Une nouvelle méthode consisterait à dissoudre le CO_2 dans de la saumure chaude et riche en méthane. Ce dernier serait extrait et vendu, de même que la chaleur de la saumure, pour produire de l'électricité et chauffer les villes voisines. Le méthane pourrait aussi fournir l'énergie nécessaire au dispositif et à la capture du carbone dans les centrales électriques. Le système serait d'abord testé sur la terre ferme, mais, à terme, des installations offshore sont envisageables.



Emily Cooper

En France, pas de méthane mais des idées !

La France ne disposant pas des réserves d'hydrocarbures des États-Unis, il sera difficile d'y construire le dispositif décrit par Steven Bryant. Cependant, des systèmes combinant stockage géologique du CO₂ et géothermie sont à l'étude. Ils consistent également à dissoudre du CO₂ dans de la saumure issue d'aquifères salins profonds, à en extraire de la chaleur et à renvoyer le liquide dans le sous-sol. Les systèmes géothermiques déjà en place seraient utilisables.

En France, le stockage géologique pourrait être en partie financé par une autre source de revenus : le droit d'émettre du CO₂ est payant en Europe. Des quotas d'émission y sont vendus, même si leur prix est aujourd'hui trop faible et que les mécanismes du marché du carbone doivent être révisés.

Outre les moindres besoins de financement externe, le système combiné a plusieurs avantages par rapport au dispositif classique, qui consiste à envoyer du CO₂ sous une forme thermodynamique particulière, dite supercritique, dans les aquifères salins. D'abord, le gaz est dissous et risque moins de s'échapper, puis de remonter vers la surface. Par ailleurs, on peut mieux contrôler la pression dans l'aquifère grâce aux puits d'extraction, ce qui limite les risques sismiques.

Dans un dispositif classique, le gaz se dissout aussi, mais bien plus lentement (parfois en plusieurs centaines, voire milliers d'années), et son injection continue augmente la pression. En conséquence, on doit surveiller que le CO₂ ne migre pas vers les aquifères d'eau potable, moins profonds, qu'il ne dégrade pas la qualité des res-

sources en eau et qu'il n'accroît pas l'activité sismique.

La quantité de gaz stockable est plus importante sur un site classique : elle est de l'ordre de 20 à 50 millions de tonnes, contre dix fois moins sur un site combinant stockage et géothermie. En effet, le CO₂ est plus compact sous une forme supercritique que sous une forme dissoute.

Au total, il faudra stocker plusieurs gigatonnes de CO₂ en Europe d'ici 2030 pour remplir les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Les formations géologiques adaptées ne manquent pas *a priori*, mais certains aspects doivent encore être validés. Pour les dispositifs classiques, plusieurs installations à petite échelle, qui servent de démonstrateurs, sont installées en Europe. En France, seule une installation un peu parti-

culière fonctionne : elle se trouve à Lacq, où le CO₂ est envoyé dans un ancien réservoir de gaz naturel, aujourd'hui vide. Ce type de système est intéressant mais sera loin de suffire. Il faudrait donc développer d'autres sites, en particulier dans le Bassin parisien, qui abrite le plus grand aquifère salin français. Cependant, les financements manquent depuis le début de la crise économique en 2008. Les dispositifs combinant géothermie et stockage du CO₂ sont à un stade plus précoce encore : des études sont menées pour évaluer leur faisabilité et leur viabilité économique, dans le cadre du projet *CO₂ Dissolved*, financé par l'Agence nationale de la recherche et coordonné par le BRGM.

Pascal Audigane,
BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières), Orléans

il faudrait construire 200 réacteurs d'un gigawatt chacun.

Si l'énergie géothermique sert au chauffage, à la climatisation et à la production d'eau chaude, on récupérera une puissance de près de 200 gigawatts, équivalente à celle que fournira le méthane extrait. La demande locale suffira-t-elle à l'absorber ? Cela reste à établir, mais une grande partie de cette puissance pourrait en tout cas être consommée par les nombreuses usines pétrochimiques de la côte du golfe et les dispositifs de capture du CO₂ qui y seraient construits. Si l'énergie géothermique est convertie en électricité avec un rendement de dix pour cent (typique d'une telle conversion), quelque 20 gigawatts d'électricité seront produits, ce qui reste important.

Pour le stockage d'une gigatonne de CO₂, la quantité de méthane produite serait d'environ 110 milliards de mètres cubes par an, soit environ un sixième de la consommation américaine. Sur un siècle, cela représente 100 gigatonnes de CO₂ séquestrées et près de 11 000 milliards de mètres cubes de méthane extraits, soit moins d'un dixième de la quantité estimée dans les aquifères profonds de la côte du golfe. Il y a donc largement assez de place pour stocker du CO₂ et assez de méthane pour une exploitation pérenne.

Si ce méthane est brûlé dans des centrales électriques pendant un siècle, quelque

20 gigatonnes de CO₂ seront émises – à moins que ce gaz ne soit recapturé. En conséquence, la baisse nette de la quantité de CO₂ envoyée dans l'atmosphère serait de 80 gigatonnes.

■ BIBLIOGRAPHIE

H. Breunig et al., *Regional evaluation of brine management for geologic carbon sequestration*, *International Journal of Greenhouse Gas Control*, vol. 14, pp. 39-48, 2013.

R. Ganjdanesh et al., *Coupled CO₂ sequestration and energy production from geopressured-geothermal aquifers*, *SPE Journal*, en ligne le 24 mai 2013.

B. Gibert et al., *Géothermie : un potentiel à creuser !*, *Dossier Pour la Science*, n° 69, pp. 64-70, 2010.

McM. Burton et S. Bryant, *Eliminating buoyant migration of sequestered CO₂ through surface dissolution*, *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, vol. 12, pp. 399-407, 2009.

15 pour cent des objectifs américains de réduction des émissions

L'association *Union of Concerned Scientists* (littéralement l'Union des scientifiques responsables) estime que pour limiter la concentration de CO₂ atmosphérique à 450 particules par million (le niveau généralement admis pour que le réchauffement ne dépasse pas 2 °C), les émissions des pays industrialisés devront chuter à 25 pour cent de leur niveau de l'an 2000 d'ici 2050. Cela correspond à 150 gigatonnes de CO₂ en moins pour les États-Unis. Même si la séquestration dans la saumure n'atteignait une gigatonne par an que dans 20 ans, elle pourrait représenter 15 pour cent de cette quantité.

Il faudra empêcher autant que possible les fuites de méthane dans l'atmosphère, car ce gaz exerce un effet de serre 20 fois plus puissant que le CO₂. L'Agence américaine pour l'environnement surveille ces fuites et les industriels ont tout intérêt à ne pas laisser s'échapper le produit qu'ils veulent vendre.

Les puits de saumure seraient similaires à des puits conventionnels de pétrole et de gaz, dont la technologie est bien maîtrisée. Les traitements effectués sur la saumure, le méthane et le CO₂ ne seraient pas plus complexes que ceux menés dans les usines pétrochimiques, une autre industrie mature. Finalement, le forage et l'exploitation des puits de saumure ressembleraient beaucoup aux opérations pétrolières pratiquées depuis des décennies. Ils ne nécessiteraient pas, comme les gaz de schistes, l'envoi et l'élimination de fluides chargés en produits chimiques pour fracturer la roche et en extraire le gaz.

Le risque d'augmenter l'activité sismique serait très faible. Des recherches récentes montrent que l'injection de grandes quantités de fluides dans certaines formations géologiques – parfois entreprise pour éliminer les eaux usées – pourrait accroître la probabilité de tremblements de terre. Cependant, le dispositif que nous proposons fonctionne en circuit fermé : toute la saumure injectée est d'abord extraite du même réservoir. Ainsi, la pression moyenne n'augmente

pas. L'accroissement du risque sismique serait même inférieur à celui résultant d'installations géothermiques classiques, où l'eau circule souvent dans des types de roches plus dures et plus susceptibles de déclencher des tremblements de terre.

Des investissements incontournables

Si l'exploitation du méthane et de l'énergie géothermique couvrirait les coûts d'exploitation, la construction du système coûterait cher. L'investissement pourrait être répercuté sur les contribuables, comme c'est souvent le cas pour les centrales électriques, ou se traduire par une augmentation du coût de l'électricité. Mais n'importe quel effort significatif pour réduire les émissions de CO₂ aurait le même effet – que ce soit la construction de milliers de fermes solaires ou éoliennes, ou celle de 200 réacteurs nucléaires pour remplacer les centrales électriques au charbon.

Nos calculs indiquent que le système devrait fonctionner, mais il reste à le tester

sur le terrain. Des chercheurs des laboratoires Sandia et Lawrence Livermore (rattachés au Département de l'énergie américain) et de l'Université d'Édimbourg, en Écosse, conçoivent des moyens d'injecter du CO₂ dans la saumure et d'en extraire de l'énergie. Et deux entreprises, qui souhaitent rester anonymes, envisagent la construction d'un site pilote sur la côte du golfe.

Pour limiter le réchauffement climatique, il nous faut réduire les émissions de gaz à effet de serre le plus tôt possible. La côte du golfe, aux États-Unis, est l'endroit idéal pour un système combinant l'exploitation de la saumure et la séquestration de CO₂. La construction de dispositifs similaires ailleurs augmenterait d'autant l'impact sur les émissions mondiales. Il reste à identifier précisément d'autres sites favorables, susceptibles de se trouver partout où il y a des hydrocarbures, le paramètre critique étant la présence de méthane dans la saumure. On pourrait commencer par chercher en Chine et en Russie, qui ont des émissions croissantes de CO₂ et d'importants bassins pétroliers et gaziers. ■



france culture

LA MARCHÉ DES SCIENCES

Découvertes, inventions, aventures savantes au fil de l'Histoire

Aurélien Luneau
14h-15h / chaque jeudi

franceculture.fr

SCIENCE

Janvier 2014. Photo : Marc Durand. © Philippe Bessière. Couverture : Jeanne Yvonne. ADAP. Paris 2013.

Les activités criminelles laissent souvent des traces dans les ordinateurs, téléphones et autres appareils électroniques. Le recueil et l'analyse de ces indices sont devenus une part essentielle des enquêtes judiciaires.

Simson Garfinkel



L'ESSENTIEL

■ Les experts en informatique judiciaire recherchent des éléments significatifs dans les mémoires de dispositifs électroniques variés : ordinateurs, téléphones portables, routeurs de réseaux, etc.

■ Pour ce faire, ils ont développé des techniques élaborées, visant par exemple à reconstituer des fichiers partiellement effacés ou à détecter des photos retouchées.

■ Les défis auxquels ils sont confrontés s'accroissent avec l'augmentation de la quantité de données et la diversification des matériels et des logiciels.

Pour la Science, © Shutterstock/Igor Lateci

Depuis les années 1980, les ordinateurs sont de plus en plus présents dans la vie de tous les jours. Le monde du crime n'y échappe pas. Les criminels, comme d'autres personnes, stockent des données et communiquent avec leurs complices. Ces activités laissent des traces dans les appareils utilisés. Cela a conduit au développement de l'informatique judiciaire, qui vise à recueillir et à analyser les indices présents sur tout dispositif doté d'une mémoire numérique : ordinateur, téléphone portable, réseau...

Les experts de ce domaine sont confrontés à certains des problèmes les plus difficiles de l'informatique, tels que l'analyse de données massives et variées, le traitement automatique des langues naturelles et la cybersécurité. Ils sont impliqués dans l'élucidation de deux types de forfaits : ceux perpétrés dans le monde physique, mais dont des preuves sont enregistrées sur un dispositif électronique, et ceux qui sont intrinsèquement liés aux systèmes informatiques, tel le piratage. Nous examinerons ici la façon dont sont stockées les données sur un dispositif électronique, ainsi que les techniques développées par l'informatique judiciaire pour les extraire, les analyser, voire les reconstruire quand l'utilisateur a tenté de les effacer.

L'efficacité de l'informatique judiciaire vient de ce que nombre de systèmes numériques conservent de grandes quantités d'informations. Il s'agit d'examiner aussi bien les ordinateurs et les téléphones portables des suspects de crime que les données électroniques des entreprises lors de litiges. Les enquêteurs récupèrent souvent d'anciens courriers électroniques, des historiques de discussion en ligne, des termes de recherche sur Google ou d'autres types de données, créés des semaines, des mois, voire des années plus tôt. Ces enregistrements peuvent révéler l'état d'esprit d'un individu ou ses intentions au moment où un crime a été commis. Les techniques de l'informatique judiciaire peuvent aussi renseigner sur les victimes : un téléphone retrouvé sur un cadavre non identifié serait étudié de la même façon qu'un appareil perdu pendant un cambriolage.

L'informatisation rend l'enquête plus compliquée que si les données étaient inscrites sur du papier. Par exemple, Bernard Madoff, arrêté en 2008 pour des escroqueries financières, suivait les comptes de ses victimes sur un ordinateur IBM datant des

années 1980. L'ancienneté de cette machine explique en partie la durée exceptionnellement longue de la fraude – qui a couru sur plus de deux décennies –, car peu de personnes à Wall Street maîtrisaient encore ce type de matériel. Elle a aussi compliqué l'interprétation des données après l'arrestation de B. Madoff.

Les indices numériques peuvent aussi révéler une absence de manipulation. En mai 2006, un ordinateur portable et un disque dur externe ont été dérobés au Département américain des anciens combattants. Ils contenaient des données sensibles concernant plus de 26 millions de vétérans et d'employés de l'armée. Quand l'ordinateur a été retrouvé en juin 2006, les enquêteurs ont montré que les dossiers sensibles n'avaient probablement pas été consultés. Pour ce faire, ils ont notamment examiné les heures d'accès et de modification associées à chaque fichier. Mais en utilisant les mêmes techniques judiciaires qu'eux, les coupables auraient pu visionner les fichiers sans modifier ces horodatages ; en fait, les enquêteurs ont juste déterminé que les fichiers n'avaient pas été ouverts par des moyens classiques.

Des données volatiles et invisibles

En pratique, les informations obtenues ne sont pas tant limitées par la technologie que par les coûts et les besoins. Le désir intellectuel d'examiner jusqu'au dernier octet est rarement justifié et l'on s'arrête souvent quand on en sait assez pour incriminer un suspect. Les contraintes légales conditionnent aussi la façon dont l'analyse est effectuée.

Les données électroniques nécessitent une attention particulière. Une mauvaise manipulation peut vite les modifier, les endommager ou les effacer. Le simple fait d'allumer un GPS du commerce risque d'entraîner la suppression de preuves cruciales. En outre, les ordinateurs contiennent souvent des informations cachées, pour lesquelles on doit utiliser des outils spécifiques. Par exemple, un appareil photo qui semble contenir 30 photos peut en réalité en renfermer plusieurs centaines, censées être effacées mais en réalité récupérables. En effet, quand un appareil « efface » un fichier, il ne nettoie pas la mémoire, il note juste que l'espace est disponible ; le fichier n'est supprimé que lorsqu'un autre