

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).

SCIENCE

Les vikings

Les utilisations du laser

Symétrie et maths

Le voyage spatial

Les neutrinos

Les allergies

Météorologie : la science de la mesure

Sida : les grands défis

Les climats anciens

Les atomes froids

Symétrie et art

Les ondes gravitationnelles

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

Enterrer le carbone en déterrando 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