

de l'Ouest. Le berceau de la nouvelle épidémie se situe dans le Sud forestier de la Guinée-Conakry, sans doute dans le village de Meliandou où les premiers cas seraient apparus en décembre 2013. Des foyers sont ensuite apparus dans des villages alentour, puis se sont multipliés et ont gagné plusieurs régions du pays et, ce qui est inédit, une capitale de taille importante : Conakry.

Autre fait sans précédent, l'épidémie s'est propagée à deux pays limitrophes : le Libéria et la Sierra Leone, dont presque toutes les régions sont touchées, y compris les capi-

maines. C'est possible par l'isolement précoce et systématique des malades et le suivi exhaustif de leurs contacts durant les 21 jours précédents. Mais cela nécessite d'importants moyens humains et financiers ainsi que l'adhésion des populations, alors que les pays concernés sont des régions pauvres, où la guerre civile a sévi dans un passé récent et où les autorités ont peu de crédit.

On peut être d'un relatif optimisme pour la région de Conakry en Guinée. En revanche, la situation en Sierra Leone et au Libéria est très préoccupante. Au Libéria, la situation est telle que l'état d'urgence a été instauré le 6 août, avec un couvre-feu sur l'ensemble du pays. Dans cet État comme en Sierra Leone, le système de santé, déjà défaillant, est soumis à une forte pression. Et des compagnies aériennes ont suspendu leurs vols avec ces deux pays, vers lesquels il sera de plus en plus difficile d'apporter l'aide internationale...

La grande crainte est que l'épidémie atteigne les pays limitrophes tels le Sénégal, la Côte d'Ivoire, voire le Mali, malgré les précautions de ces pays et de leurs partenaires. Quant à l'Europe, elle peut redouter un petit nombre de cas importés, mais ses ressources et ses systèmes de santé sont aptes à casser tout début de chaîne épidémique. Les épidémies, comme les autres fléaux, s'attaquent surtout aux pauvres. L'épidémie actuelle devrait donc rester limitée aux pays aux plus bas revenus et dont les populations partagent des traits culturels communs, notamment ceux consistant à toucher le mort lors des funérailles.

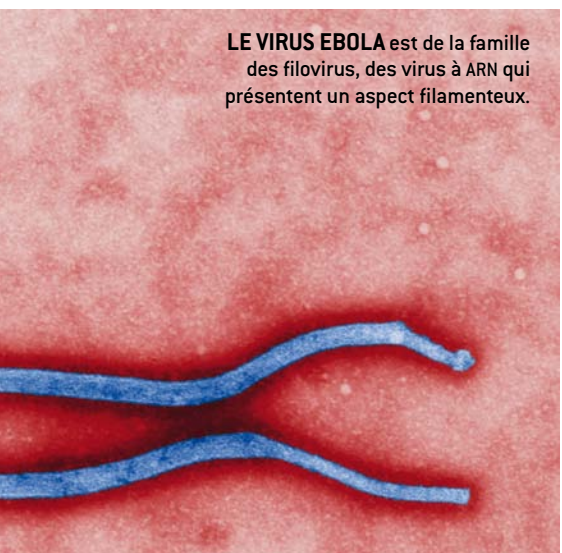
Certes, les partenaires du réseau mondial d'alerte et d'action en cas d'épidémie piloté par l'OMS – *Médecins sans frontières*, la *Fédération internationale des Sociétés de la Croix-Rouge et du Croissant-Rouge*, les *Centers for Disease Control and Prevention* américains, l'Institut Pasteur et son réseau international, etc. – sont pleinement mobilisés. Mais ils peinent à maintenir l'effort compte tenu de l'ampleur et de la durée de cette épidémie. ■

Jean-Claude MANUGUERRA dirige la Cellule d'intervention biologique d'urgence (CIBU) de l'Institut Pasteur, à Paris.

La 26^e épidémie depuis 1976

- L'épidémie actuelle de fièvre d'Ebola a été précédée de 25 autres.
- Les plus petits épisodes épidémiques ont touché une seule personne ; le plus important, en Ouganda en 2000, a fait 425 victimes dont 224 sont mortes.
- Le nombre total de cas et de décès était, avant 2014, de 2 299 et de 1 540 respectivement.
- Pour les épisodes épidémiques de plus d'un cas, la létalité a varié de 25 % (Ouganda, 2007) à 90 % (RDC, 2003).
- Pour l'épidémie de 2014, le taux de létalité est jusqu'ici d'environ 50 %.

LE VIRUS EBOLA est de la famille des filovirus, des virus à ARN qui présentent un aspect filamenteux.



© Centers for Disease Control - digital version copyright Science Faction/Science Faction/Corbis

tales. C'est la plus grave épidémie d'Ebola avec, au 28 août 2014, un total de 3 069 cas recensés (plus que l'ensemble des 25 épidémies précédentes), dont 1 552 décès. Et la situation est rendue logistiquement très difficile par le nombre de foyers simultanés, lui aussi sans précédent.

Un quatrième pays non limitrophe a été touché par un voyageur ayant pris l'avion pour le Nigéria. C'est la première fois qu'un patient à symptômes prend un vol commercial (mais sans contaminer d'autres passagers ou des membres de l'équipage). Pour l'instant, la situation est contrôlée dans ce pays (17 cas dont six décès, tous des cas secondaires liés directement au voyageur).

L'épidémie devrait durer encore plusieurs mois, six à neuf selon l'OMS. L'urgence est d'arrêter la chaîne de contamination interhu-



Réagissez au
Point de vue sur
www.pourlascience.fr

ENTRETIEN

Gaz de schiste : pourra-t-on les exploiter proprement ?

Entretien avec Gilles PIJAUDIER-CABOT

Les hydrocarbures de schiste, un nouvel eldorado énergétique ou un désastre environnemental ? Le débat, vif, est exacerbé par des vidéos circulant sur Internet et montrant par exemple de l'eau contaminée par du gaz qui s'enflamme quand on approche un briquet à la sortie du robinet, dans des zones situées à proximité des forages. La technique de la fracturation hydraulique, pourtant utilisée pour

extraire des hydrocarbures conventionnels depuis le milieu du XX^e siècle, est au centre de toutes les critiques. Les partisans des hydrocarbures de schiste vantent l'ampleur des réserves. Mais les estimations sont-elles fiables ? Aux États-Unis, la production de gaz de schiste a en tout cas explosé au milieu des années 2000. Cet essor massif s'est déroulé dans un contexte peu réglementé, où la quête de la rentabilité a conduit à des

accidents écologiques, telle la contamination des nappes phréatiques. Quelle est la part des limitations techniques et celle des mauvaises pratiques dans ces accidents ? Peut-on améliorer les techniques d'extraction pour exploiter sans risque les réserves ? Le point avec Gilles Pijaudier-Cabot, qui dirige le Laboratoire des fluides complexes et leurs réservoirs (UMR 5150, Total-CNRS-Université de Pau et des pays de l'Adour), et l'Institut Carnot ISIFoR.



POUR LA SCIENCE

Qu'est-ce qu'un pétrole, une huile ou un gaz de schiste ?

GILLES PIJAUDIER-CABOT : Il s'agit d'hydrocarbures piégés dans des argiles très peu perméables nommées schistes. Dans le cas d'hydrocarbures conventionnels, le pétrole ou le gaz se forme dans une roche qualifiée de roche-mère, puis migre vers le haut dans une « roche-réservoir » poreuse, surmontée par une « roche d'étanchéité », qui empêche leur fuite. Pour les schistes, les hydrocarbures restent piégés dans la roche-mère.

Par conséquent, les gisements sont plus difficiles à exploiter : il faut fracturer la roche pour que les hydrocarbures s'en échappent. Pour ce faire, on injecte de l'eau sous pression, mélangée à du sable (pour éviter que les fissures ne se referment trop vite) et à divers additifs (tels des lubrifiants favorisant la pénétration du sable dans les fissures).

Le terme d'huile désigne de façon générique tous les hydrocarbures liquides. Ceux-ci

vont des pétroles « légers » (peu visqueux et comportant peu d'impuretés) aux plus lourds (les bitumes).

PLS

Quelle est l'ampleur de leur exploitation et des réserves ?

G. P.-C. : Aujourd'hui, on exploite surtout du gaz. Dans la plupart des cas, les huiles sortent beaucoup moins facilement de la roche. Elles sont tout de même exploitées dans quelques champs de puits aux États-Unis, et des recherches sont en cours pour développer des techniques d'extraction. En effet, la demande des pétroliers se redirige vers ce produit, en raison d'une certaine saturation des marchés du gaz due à l'afflux des gaz de schiste.

L'exploitation des schistes a surtout lieu aux États-Unis. Plusieurs pays commencent à explorer leur sous-sol en détail, voire, pour certains, à extraire du gaz. Ainsi, début 2014, une

centaine de puits avaient déjà été creusés en Chine (contre 40 000 au total aux États-Unis).

Les réserves mondiales s'élèveraient à 345 milliards de barils de pétrole (55 milliards de mètres cubes) et 207 000 milliards de mètres cubes de gaz de schiste techniquement extractibles, selon une estimation de l'Agence américaine d'information sur l'énergie (EIA) datée de 2013. Cela représenterait 10 % du pétrole et 32 % du gaz techniquement exploitables dans le monde. Plusieurs pays seraient particulièrement bien dotés : États-Unis, Argentine, Russie, Algérie, Canada et le Mexique. En Europe, la France serait, avec 3 900 milliards de mètres cubes de gaz, en deuxième position, derrière la Pologne.

PLS

Ces estimations sont-elles fiables ?

G. P.-C. : Pas toujours. Dans le cas de la France, l'estimation est fondée sur des reconnaissances effectuées par le BRGM (Bureau de recherches

géologiques et minières), l'IFPEN (Institut français du pétrole et des énergies nouvelles) et quelques entreprises qui produisent du pétrole dans le pays (notamment en Seine-et-Marne). Cependant, cette estimation est soumise à de grandes incertitudes : les réserves réelles pourraient être dix fois supérieures ou dix fois inférieures. En outre, on est loin de toujours savoir si les gisements seraient faciles à exploiter et rentables. Le cas de la Pologne, où l'Institut national de géologie a divisé par dix les premières estimations américaines après avoir réalisé quelques dizaines de forages exploratoires, est emblématique.

Le forage d'une cinquantaine de puits à travers la France suffirait sans doute à préciser les estimations, mais des blocages institutionnels l'empêchent. Dans l'Hexagone, l'État est propriétaire du sous-sol. Il doit donc soit délivrer des permis de forage, soit l'organiser lui-même. Or tous les permis ont été annulés et l'État ne souhaite pas investir dans un tel programme de reconnaissance. L'argument pour annuler les permis est que si une entreprise prend le risque financier d'un tel programme, elle voudra nécessairement exploiter ce qu'elle trouve, et ce au moindre coût. Pour l'instant, c'est le *statu quo*. Aux États-Unis, le propriétaire d'un terrain est aussi propriétaire du sous-sol, de sorte que les compagnies privées n'ont qu'à le rémunérer pour explorer et exploiter son sous-sol.

PLS

Quelles sont les conséquences de l'exploitation des gaz de schiste, notamment sur le plan géostratégique ?

G. P.-C. : La première conséquence est une chute des prix du gaz, due à l'offre massive. Pour diminuer la saturation du marché, les États-Unis développent les débouchés autres que l'énergie. Ainsi, le pays connaît un renouveau de l'industrie pétrochimique, qui utilise le gaz comme matière première pour fabriquer divers composés, tels que des polymères. Par conséquent, certaines régions se réindustrialisent. Le phénomène concerne surtout les États-Unis, mais à terme toutes les régions productrices d'hydrocarbures (Arabie Saoudite, Algérie, etc.) pourraient en bénéficier.

Sur le plan géostratégique, les États-Unis sont devenus exportateurs de gaz et produisent



UN FORAGE POUR L'EXTRACTION DE GAZ DE SCHISTE, dans la formation sédimentaire d'Eagle Ford, au Texas. Plus difficiles à récupérer que les hydrocarbures conventionnels, les gaz et huiles de schiste nécessitent un grand nombre d'infrastructures (forages, bassins pour stocker l'eau, routes, etc.). Cette « pollution de surface » est l'un des problèmes majeurs de leur exploitation.

désormais autant d'énergie qu'ils en consomment. Dès lors, ils sont moins dépendants des pays exportateurs tels que la Russie.

PLS

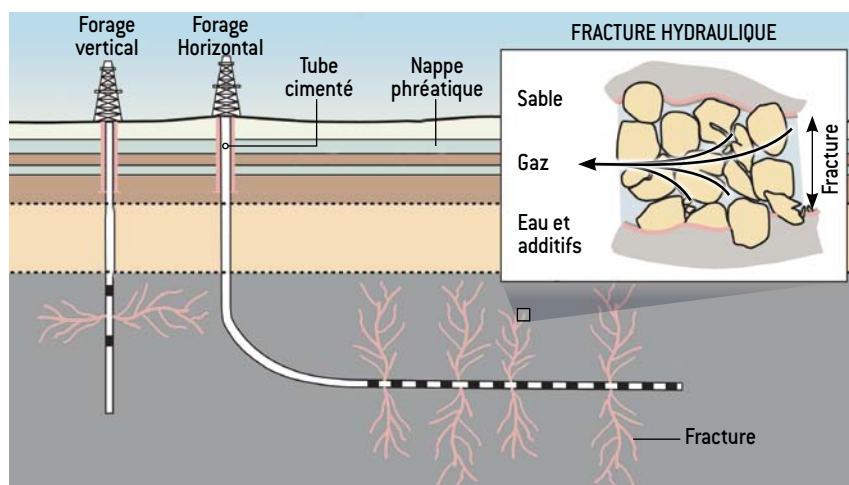
Quels sont les principaux risques environnementaux liés à cette exploitation ?

G. P.-C. : La pollution du sous-sol n'est pas un problème aux profondeurs d'injection (en général 2 000 à 4 000 mètres), où l'eau déjà présente est bien moins pure que celle qu'on injecte. On évoque parfois le danger que cette eau remonte jusqu'aux nappes phréatiques. Mais c'est peu probable, en dehors de configurations géologiques particulières : il faudrait que l'eau migre sur plusieurs centaines, voire milliers, de mètres (les nappes sont à une profondeur de l'ordre de 100 mètres). De multiples travaux sont en cours pour mieux comprendre l'impact de la fracturation hydraulique sur l'hydrologie du réservoir, et ainsi mieux cibler les zones à risque. En revanche, l'eau qui remonte par le puits contient des additifs et peut être contaminée par divers composés toxiques ou cancérogènes ; on doit donc la gérer avec soin pour ne pas menacer la santé des exploitants.

Le risque principal est qu'il y ait fuite d'eau par les puits et que cette eau traverse les

nappes phréatiques. Techniquement, on sait gérer ce risque, qui existe d'ailleurs aussi dans les exploitations classiques (où la fracturation hydraulique est utilisée pour améliorer le taux de récupération). On assure par exemple l'étanchéité avec des tubes cimentés. Le problème est plutôt d'origine économique : les dispositifs de sécurité coûtent cher et les entreprises n'ont pas toujours fait les investissements nécessaires, d'où des cas de pollution aux États-Unis. Ce problème est plus aigu pour les hydrocarbures de schiste, car, en raison de la faible perméabilité de la roche, on doit forer bien plus de puits que dans les exploitations classiques. Et comme le prix du gaz chute, il faut creuser ces nombreux puits à moindre coût.

Selon moi, le seul problème qu'on ne sait pas résoudre techniquement est celui de la « pollution de surface » : les installations nécessaires occupent en effet beaucoup de place. Il faut construire des routes, des puits, des installations industrielles, ainsi que des bassins de décantation, car on remonte énormément d'eau des profondeurs ; on doit alors la stocker, puis la réinjecter ou la traiter avant de la rejeter dans l'environnement. De façon générale, la fourniture et la gestion de l'eau est l'une des problématiques à examiner attentivement dans une exploitation.



LA FRACTURATION HYDRAULIQUE consiste à injecter de l'eau sous pression dans le sol, afin de connecter les pores de la roche par des fissures et de récupérer le gaz qui y est piégé. Du sable mélangé à l'eau empêche les fissures de se refermer trop vite. L'eau sous pression, chargée de gaz, reflue ensuite naturellement dans le puits. Dans le cas des schistes, on utilise des forages horizontaux qui peuvent s'étendre sur plusieurs kilomètres.

PLS

On accuse aussi les forages d'entraîner des fuites de gaz à effet de serre...

G. P.-C. : Il y a en effet des fuites de méthane, un puissant gaz à effet de serre, dans l'atmosphère. Là encore, ce n'est pas inhérent aux schistes, mais commun à toutes les installations d'extraction de gaz, et là encore, le problème est économique plus que technique : comme il faut creuser de multiples puits à faible coût, les bonnes pratiques permettant la maîtrise des fuites ne sont pas toujours respectées. Dans le bilan des schistes en termes d'émissions de gaz à effet de serre, il faut aussi rappeler que la combustion du gaz naturel émet moins de dioxyde de carbone que celle du charbon à énergie égale. Le bilan global suscite donc la controverse.

PLS

On a aussi évoqué des risques de séisme et d'affaissement de terrain. Qu'en est-il ?

G. P.-C. : Pour les séismes, il existe bien sûr des zones instables, qu'il faut éviter. En dehors de ces zones, le risque est mineur : on constate de la microsismicité, mais trop faible pour affecter l'environnement ou l'habitat. D'autres activités humaines ont d'ailleurs plus d'impact. Ainsi, selon une étude américaine publiée en 2012,

la géothermie avait provoqué des séismes plus nombreux et plus importants que l'exploitation des gaz de schiste.

Quant aux affaissements, on en a observé de légers dans les champs d'hydrocarbures conventionnels. Les réservoirs sont comme des éponges gorgées d'eau, qui se contractent en se vidant. En général, le terrain ne se tasse que d'un centimètre ou deux, ce qui ne pose pas de problème particulier. Pour les gaz de schiste, la situation est plus incertaine. Les roches sont sous-saturées en eau, c'est-à-dire qu'elles en absorbent beaucoup. On ne récupère que 30 ou 40 % de l'eau injectée. Le risque n'est donc pas tant de provoquer des affaissements que de modifier le comportement de la roche. Pour le comprendre, on peut se représenter une argile utilisée pour la poterie : quand on y ajoute de l'eau, on la transforme en une sorte de pâte à modeler. Dès lors, on pourrait provoquer des déformations et des mouvements de terrain, susceptibles de survenir plusieurs dizaines d'années après l'exploitation.

Le sentiment des ingénieurs est que le risque est faible, mais on manque de données scientifiques pour l'exclure totalement. Je ne connais que deux travaux publiés sur ce sujet. Dans mon laboratoire, nous avons lancé un projet pour l'étudier il y a un an, mais nos recherches, qui tentent d'éclaircir le phénomène au niveau moléculaire, sont encore très préliminaires.

PLS

L'Allemagne semble s'orienter vers une autorisation sous condition de l'exploitation. Des mesures réglementaires, telles des interdictions locales, vous semblent-elles suffisantes pour limiter les nuisances ?

G. P.-C. : Le problème en France est que l'on ne connaît pas assez bien le sous-sol. Pour décider d'interdire ou de restreindre l'exploitation dans une certaine zone, on doit disposer d'un certain nombre de paramètres : degré de fissuration, sismicité, stabilité et hydrologie du sous-sol, etc. Si l'on cherche à légiférer aujourd'hui sans bien cerner tous ces paramètres, on risque d'aboutir à l'application systématique du principe de précaution et à une interdiction généralisée.

Avant de fixer un cadre réglementaire, il faut donc d'abord lancer un grand programme d'exploration du sous-sol. Plusieurs projets existent. L'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE) a élaboré un programme de recherche sur les gaz de schiste qui coûterait environ 20 millions d'euros, et dont une partie importante serait consacrée à l'exploration. Pour l'instant, ces projets dorment sur les étagères...

Le seul cas sur lequel il serait intéressant de légiférer dès aujourd'hui est celui de la pollution de surface. Dans certaines zones, telles les réserves naturelles, les installations nécessaires à l'exploitation des schistes nuiraient trop au paysage et à la biodiversité.

PLS

Comment explore-t-on le sous-sol ?

G. P.-C. : L'exploration se déroule en trois phases. D'abord, on analyse la géologie de la surface et on en déduit certains paramètres du sous-sol. Ensuite, on utilise des explosifs pour envoyer des ondes sismiques dans le sous-sol, dont on reconstitue les propriétés grâce à l'analyse des ondes réfléchies. Sur la base de cette reconnaissance géophysique, on réalise quelques forages pour vérifier et affiner les résultats.

PLS

Quelles pistes envisage-t-on pour améliorer les techniques d'extraction ?

G. P.-C. : Le consensus parmi les ingénieurs et les chercheurs est que la priorité est d'améliorer la fracturation hydraulique, plutôt que de développer des alternatives. Cette technique est la plus mature techniquement et économiquement. L'objectif n'est pas forcément de fracturer davantage la roche, mais de mieux comprendre les phénomènes à l'œuvre afin d'améliorer la sécurité des exploitations (qui sont déjà rentables) et de mieux cibler les zones à risque.

De grands programmes ont été lancés. L'un, en Europe, se déroule principalement dans les universités du Pays-Bas et est financé par des groupes privés, tels BP, Total ou Exxon. Aux États-Unis, la *National Science Foundation* (NSF) soutient financièrement des projets associant entreprises et grandes universités. Au Canada, des recherches rassemblent aussi les principales universités. Chaque projet de ces programmes peut coûter plusieurs millions d'euros. D'autres projets, plus modestes, sont menés un peu partout.

PLS

Pourriez-vous préciser ce sur quoi portent tous ces projets ?

G. P.-C. : Il y a trois grands axes et un certain nombre de projets additionnels. Le premier grand axe vise à mieux comprendre la physique de la fracturation en milieu hétérogène. Que se passe-t-il quand la fracture rencontre un joint, c'est-à-dire une zone plus molle ou moins propice à la propagation ? S'y propage-t-elle tout de même ou s'y arrête-t-elle, laissant l'énergie se dissiper par l'ouverture d'autres fissures autour du joint ? C'est ce genre de questions, notamment, que nous étudions dans mon laboratoire.

Dans le deuxième grand axe, on cherche à modéliser numériquement le réservoir, afin de déterminer le trajet des fissures. Tandis que le premier axe concerne des analyses fines et locales, il s'agit ici de prévoir le comportement de tout le massif rocheux. Il est très difficile d'étudier la propagation des fissures à une échelle aussi vaste, car les calculs nécessaires deviennent très lourds.

Le troisième axe traite du contrôle *in situ* de la fracturation hydraulique. L'ouverture d'une fissure crée un bruit sismique, composé de petites ondes qui se propagent. On cherche alors à le détecter en surface et à déduire les endroits où la roche s'est fissurée. On pourrait

Quelques chiffres

- **Consommation mondiale de gaz (en 2013) :**
3 347 milliards de m³.
- **Réserves mondiales de gaz de schiste techniquement extractibles :**
207 000 milliards de m³
(soit 32 % des réserves totales de gaz), selon l'EIA.
- **Production américaine de gaz (en 2011) :**
651 milliards de m³, dont 34 % de gaz de schiste.
- **Consommation d'eau associée aux gaz de schistes : 10 000 à 15 000 m³ par puits.**

■ BIBLIOGRAPHIE

P. Papon, *Le gaz de schiste : mythes et réalités*, *Futuribles*, n° 399, pp. 81-98, mars-avril 2014.

Energy outlook 2035, BP, 2014.
bp.com/energyoutlook

D. Turcotte *et al.*, *Super fracking*, *Physics Today*, août 2014.

National Research Council, *Induced seismicity potential in energy technologies*, The National Academies Press, 2012 [en accès libre sur www.nap.edu].

J.-L. Fellous et C. Gautier, *Les gaz de schiste - Nouvel eldorado ou impasse ?*, Odile Jacob, 2013.

R. Mosseri et C. Jeandel (dir.), *L'énergie à découvert*, CNRS Éditions, 2013.

alors surveiller cette dernière en temps réel. Des modèles ont été construits, et on en est au stade de la validation expérimentale.

Tous ces travaux permettront de mieux comprendre les phénomènes déclenchés dans le sous-sol par la fracturation hydraulique. C'est un point clef pour décider où elle risque d'être dangereuse, et ainsi autoriser ou non l'exploitation des gaz de schistes dans un endroit particulier.

PLS

Et sur quoi portent les autres projets ?

G. P.-C. : Certains visent à remplacer l'eau par un fluide différent, voire un gel. L'entreprise canadienne *GazFrac* commence à tester un gel de propane sur un site pilote et sa technique devrait être bientôt disponible. Ce gel pénètre mieux dans la roche, augmente le nombre de fissures et en ressort plus facilement. On peut le récupérer ensuite. La principale difficulté est que le propane est inflammable. Les installations doivent donc être sécurisées.

Enfin, quelques travaux visent à rendre les additifs plus propres, par exemple en les choisissant biodégradables. L'entreprise *Exxon* utilise ainsi de la gomme de guar (une sorte de haricot qui pousse surtout en Inde) pour augmenter la viscosité de l'eau.

PLS

Les pistes alternatives à la fracturation hydraulique sont-elles abandonnées ?

G. P.-C. : Non, pas complètement. La fracturation par explosifs est un peu étudiée aux États-Unis, mais elle en est encore au stade du laboratoire. De notre côté, nous travaillons sur une technique consistant à fracturer la roche grâce à des décharges électriques. Nous avons fait une pause dans les recherches, car nous en sommes à un stade où un prototype serait nécessaire, et c'est pour l'instant impossible à mettre en œuvre en France. L'avantage d'une telle technique, et d'autres qui sont à l'étude, est qu'elles permettraient un meilleur contrôle de la fissuration : celle-ci s'arrête vite quand on stoppe les impulsions électriques ou la mise à feu d'explosifs. Avec la fracturation hydraulique, le risque de propagation instable des fissures est plus élevé. ■

Propos recueillis par Guillaume JACQUEMONT

La gravité artificielle vue par le cinéma

par Richard Taillet, sur *Signal sur bruit*

Dans les films de science-fiction, les scènes d'apesanteur sont un casse-tête pour les réalisateurs : il faut user d'effets spéciaux et filmer dans des conditions inhabituelles. Rares sont les films où l'apesanteur n'est pas une simple parenthèse anecdotique. D'une façon ou d'une autre, une pesanteur artificielle est rapidement recréée et le scénario reprend son cours avec des personnages qui évoluent comme sur Terre. Comment est créée cette pesanteur artificielle ? Je me concentrerai ici sur une des explications plausibles : l'utilisation de centrifugeuses.

Si on place une roue de hamster en apesanteur, et qu'on fait tourner cette roue à vitesse angulaire constante, le hamster est soumis à une force centrifuge qui le plaque contre la roue. Il pourra alors marcher le long de celle-ci, comme s'il était soumis à une force de gravité dirigée vers l'extérieur. Remplaçons le hamster par un astronaute : c'est le principe des roues spatiales présentes par exemple dans les films *Conquest of space* (1955), *2001, l'Odyssée de l'espace* (1968) ou *Mission to Mars* (2000) [voir les extraits à l'adresse http://bit.ly/pls444_scilogs].

En réalité, les personnages évoluant dans ces centrifugeuses sont aussi soumis à la force de Coriolis. Quand on saute vers le « haut » – vers le centre de la roue –, cette force nous entraîne sur le côté. Mais à ma connaissance, la force de Coriolis n'a jamais été exploitée dans un film.

Concentrons-nous donc sur la force centrifuge qui permet de simuler la gravité. La gravité g ressentie à la distance r de l'axe de rotation dépend de la vitesse de rotation N (en tours par seconde) selon la formule $g = r(2\pi N)^2$. On peut la calculer pour plusieurs films. Dans *2001, l'Odyssée de l'espace*, la station orbitale est une grande roue de 280 mètres de rayon, tournant à un tour par minute, et le vaisseau spatial envoyé vers Jupiter contient une centrifugeuse de six mètres de rayon tournant

à trois tours par minute, ce qui donne respectivement $g = 3 \text{ m/s}^2$ et $g = 0,6 \text{ m/s}^2$, soit moins d'un tiers et moins d'un quinzième de la pesanteur terrestre ($g = 9,8 \text{ m/s}^2$). Aucune de ces situations n'est donc réaliste : les personnages ne devraient pas pouvoir marcher de manière « naturelle ». La scène de *Conquest of space* est beaucoup plus réaliste, même si on a l'impression que la roue tourne trop vite.

La force centrifuge est d'autant plus faible que l'on se rapproche de l'axe de rotation et,



Dans le film *2001, l'Odyssée de l'espace*, la station spatiale comporte deux roues de 280 mètres de rayon en rotation.

© Rhys Taylor/Stocktrek Images/Corbis

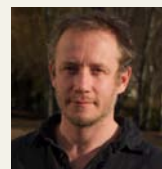
dans les scènes où l'on voit les personnages se rapprocher (*Mission to Mars*) ou s'éloigner (*2001, l'Odyssée de l'espace*) de l'axe, ils devraient sentir que la gravité artificielle varie au cours de leur déplacement, ce qui n'est manifestement pas le cas. En revanche, le fait que la force centrifuge soit nulle au niveau de l'axe de rotation donne lieu à une belle scène de danse en apesanteur dans *Mission to Mars*.

L'utilisation de centrifugeuses présente cependant des limites physiologiques. D'une part, si les roues sont trop petites, la différence de pesanteur artificielle entre la tête et les pieds perturbe la circulation sanguine. D'autre part, le corps ne supporte pas une rotation trop rapide : l'oreille interne la détecte parfaitement. La scène d'*Armageddon* (1998) où un astronaute rétablit une

pesanteur artificielle en faisant tourner sa capsule spatiale est ainsi totalement irréaliste : avec un rayon de un mètre, la vitesse de rotation nécessaire pour obtenir une pesanteur terrestre est d'environ un demi-tour par seconde, ce qui rendrait malade n'importe qui !

On rencontre des erreurs plus grossières encore. Dans *Ender's Game* (2013), on voit les personnages sortir d'une centrifugeuse et continuer à marcher au sol, pour finalement s'élancer en apesanteur. Dans *Moonraker* (1979), une station spatiale est mise en rotation pour établir une gravité artificielle, mais les objets sont collés sur la surface du disque, au lieu d'être poussés vers l'extérieur ! Dans *The Green Slime* (1968), la station spatiale en forme de roue a des fenêtres sur le bord extérieur, là où devraient marcher les passagers. Enfin, le film *Elysium* (2013) met en scène une centrifugeuse réaliste, sauf que l'air semble être retenu par la seule force centrifuge.

Pour terminer, l'idée de la centrifugeuse est très répandue dans le design des vaisseaux spatiaux, même si elle n'est pas explicitement exploitée : on voit souvent une grande structure en rotation, par exemple dans *2010* (1984), *Avatar* (2009) ou *Red Planet* (2000). Reste parfois seulement une grande structure circulaire fixe, comme dans la version originale de *Solaris* (1972) ou sa reprise (2002). ■



Richard TAILLET est professeur à l'Université de Savoie et chercheur au Laboratoire d'Annecy-le-Vieux de physique théorique (LAPTh). Ce billet est une version résumée

du troisième billet d'une série sur l'apesanteur au cinéma publiée sur son blog *Signal sur bruit* (<http://www.scilogs.fr/signal-sur-bruit>).



Retrouvez tous nos blogueurs sur www.scilogs.fr et suivez-les sur les réseaux sociaux.