

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.

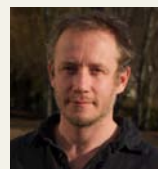
dans les scènes où l'on voit les personnages se rapprocher (*Mission to Mars*) ou s'éloigner (*2001, l'Odyssée de l'espace*) de l'axe, ils devraient sentir que la gravité artificielle varie au cours de leur déplacement, ce qui n'est manifestement pas le cas. En revanche, le fait que la force centrifuge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