



ZARM, Falltum-Betriebsgesellschaft



ZARM, Université de Brême

5. LA TOUR D'IMPESANTEUR DE BRÊME (à gauche) a été construite pour réaliser des expériences de chute libre à l'intérieur d'une capsule (à droite) de 80 centimètres de largeur tombant dans une colonne de 110 mètres de haut, où règne le vide. En bas, l'impact est amorti par un réceptacle rempli de petites billes de polystyrène. Les quelque cinq secondes de chute libre, donc d'apesanteur, ainsi créées servent le plus souvent à tester des dispositifs spatiaux, mais elles peuvent aussi être mises à profit pour tester le principe d'équivalence.

« processus interne », caractérisé par la fréquence de Compton, et celle d'une onde de matière associée au mouvement de l'objet.

L'équation de Schrödinger développée deux ans après ces considérations a fourni la description mathématique générale de la propagation de cette onde de matière. De cette équation on déduit que dans le cas d'un atome isolé, un processus périodique n'est observable que quand cet atome se trouve dans une superposition d'états d'énergie bien déterminés (états propres). Les fréquences possibles d'un tel processus dépendent des différences entre les énergies de ces états propres. Cette propriété est au fondement des horloges atomiques modernes.

Il s'agit ici des fréquences liées à l'onde de matière. Et pour la « fréquence interne » ? N'a-t-elle aucune signification pratique, ou gagne-t-elle au cours de la propagation de la particule dans le champ gravitationnel une signification sur laquelle les théoriciens doivent encore s'accorder ?

À l'intersection entre les théories de la gravitation et la théorie quantique apparaissent donc des questions conceptuelles concernant chacune des deux théories. Remarquons que nous n'avons jusqu'à présent eu affaire qu'à une situation physique relativement simple : un système quantique dans un champ gravitationnel classique. La prochaine étape logique consisterait à décrire ce champ et ses interactions avec un atome dans le cadre de la théorie quantique, au moins en partie. Des différences notables entre la gravitation et les autres

interactions devraient se manifester. Toutes les tentatives faites jusqu'à présent pour formuler une théorie de la gravitation sont parties du principe que les règles quantiques habituelles s'appliquent à la gravitation. Or ces règles n'ont fait la preuve de leur efficacité qu'avec d'autres interactions, succès qui ne signifie pas que nous ayons vraiment compris leur physique profonde. Des expériences comme celle de l'interféromètre atomique pourraient fournir aux théoriciens des indices sur les liens entre la relativité générale et la théorie quantique, les deux piliers de la physique fondamentale d'aujourd'hui.

Améliorer la précision en prolongeant la chute

À présent, les physiciens tentent d'améliorer la précision expérimentale en augmentant le temps de vol des atomes dans l'interféromètre. Le déphasage des ondes atomiques augmente en effet avec le carré du temps d'interrogation, tandis qu'il n'est que proportionnel au champ gravitationnel. Il serait possible d'augmenter ce temps de vol en réalisant par exemple l'expérience au cours d'une chute contrôlée dans une tour d'impesanteur (voir la figure 5), ou en embarquant le dispositif expérimental sur un satellite. Il existe désormais un réel espoir de préciser quelles relations entretiennent la gravitation et la théorie quantique, et notamment d'envisager le principe d'équivalence d'Einstein d'un point de vue quantique. ■

■ L'AUTEUR



Domenico GIULINI est professeur de physique théorique à l'Université Leibniz, à Hanovre en Allemagne.

■ BIBLIOGRAPHIE

D. Schlippert *et al.*, Quantum test of the universality of free fall, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 112, 203002, 2014.

S.-Y. Lan *et al.*, A clock directly linking time to a particle's mass, *Science*, vol. 339, pp. 554-557, 2013.

P. Wolf *et al.*, Does an atom interferometer test the gravitational redshift at the Compton frequency ?, *Classical Quantum Gravity*, vol. 28, 145017, 2011.

H. Müller *et al.*, A precision measurement of the gravitational redshift by the interference of matter waves, *Nature*, vol. 463, pp. 926-930, 2010.

Vaclav Smil

Beaucoup espèrent un passage rapide aux énergies renouvelables. Mais l'histoire des transitions énergétiques montre qu'elles nécessitent deux à trois générations.



Énergies renouvelables :

L'ESSENTIEL

- Les transitions énergétiques majeures – du bois au charbon, puis du charbon au pétrole – ont pris chacune 50 à 60 ans.
- L'abandon des ressources fossiles et le passage aux énergies renouvelables ne devrait pas être plus rapide. Dans les pays industrialisés, les énergies renouvelables classiques, telle l'hydroélectricité, sont déjà utilisées au maximum.
- On pourrait toutefois accélérer la transition, notamment en réalisant des économies d'énergie.



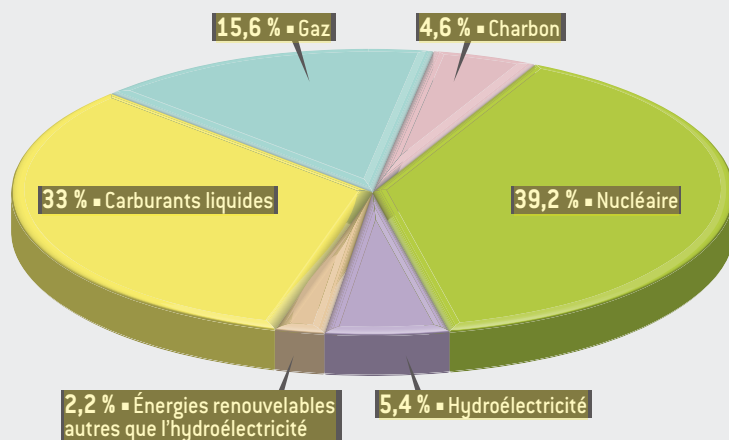
l'essor sera lent



Il y a près de 40 ans, l'écologue américain Amory Lovins affirmait qu'en l'an 2000, 33 pour cent de l'énergie produite aux États-Unis proviendraient de sources renouvelables nombreuses, petites et décentralisées. En 2008, Al Gore, l'ancien vice-président, jugeait réalisable le passage de ce pays à 100 pour cent d'énergies renouvelables en une décennie, et ce à un coût abordable. En 2009, Mark Jacobson, de l'Université Stanford, et Mark Delucchi, de l'Université de Californie, à Davis, présentaient un plan pour effectuer une telle transition à l'échelle mondiale d'ici 2030.

Cependant, de 1990 à 2012, la part des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie mondiale a à peine changé, passant de 88 à 87 pour cent. En 2011, les sources renouvelables ont fourni moins de dix pour cent de l'énergie des États-Unis, et il s'agissait pour la plupart de sources classiques, telles que les centrales hydroélectriques et le bois. Après plus de 20 ans de développement subventionné, les « nouvelles » sources d'énergie renouvelable, tels l'éolien, le solaire et les biocarburants, ne représentaient que 3,35 pour cent de l'approvisionnement énergétique des États-Unis.

La lenteur de cette transition énergétique n'est pas surprenante. En fait, elle était prévisible. Partout dans



LE BOUQUET ÉNERGÉTIQUE FRANÇAIS (ici en 2012) est dominé par le nucléaire. Les énergies renouvelables, pour l'essentiel sous forme d'hydroélectricité, n'en représentent que 7,6 pour cent. Dans ces chiffres livrés par le Service statistique de la Société BP, les biocarburants sont comptés dans les carburants liquides et non dans les énergies renouvelables (ils représentaient un peu moins de un pour cent de la consommation énergétique française en 2011, selon les données du Service de l'observation et des statistiques). En outre, le bois n'est pas pris en compte (3,7 pour cent de la consommation énergétique française en 2011). À l'échelle mondiale, en 2012, le charbon et le gaz représentaient chacun environ 30 pour cent du bouquet énergétique, le gaz 24 pour cent, le nucléaire 4 pour cent et les énergies renouvelables 9 pour cent.

le monde, chaque transition majeure entre deux combustibles a pris de 50 à 60 ans. Un passage du bois au charbon s'est d'abord produit, puis le pétrole est devenu prédominant. Aujourd'hui, les États-Unis connaissent une troisième transition énergétique majeure, du charbon et du pétrole vers le gaz naturel. Entre 2001 et 2012, les consommations américaines de charbon et de pétrole brut ont chuté respectivement de 20 pour cent et de 7 pour cent; dans le même temps, la consommation de gaz naturel a augmenté de 14 pour cent. Cependant, une décennie ou deux seront encore nécessaires avant que le gaz ne dépasse le charbon, qui fournit plus du tiers de l'électricité des États-Unis.

Les énergies renouvelables ne « décollent » pas plus vite que les nouveaux combustibles autrefois, et il n'y a aucune raison technique ou économique de penser qu'elles vont le faire. La demande énergétique mondiale augmente notablement, au point qu'il est déjà difficile de la satisfaire avec les sources d'énergies traditionnelles. Cela le serait encore plus avec les énergies renouvelables.

Le changement peut être plus rapide dans certains pays, mais, à l'échelle mondiale, le passage aux énergies renouvelables sera lent, en particulier si la conversion au gaz naturel se confirme. Bien sûr, il est possible qu'une technologie innovante ou

Même avec l'essor des machines industrielles, le charbon n'était pas la source d'énergie dominante au XIX^e siècle.

une décision politique accélère ce changement. Il reste qu'en général, les transitions énergétiques prennent du temps.

L'espoir d'une transition rapide et radicale vers les énergies renouvelables résulte d'une méconnaissance de l'histoire des deux derniers siècles. La plupart des gens pensent qu'au XIX^e siècle, où s'est produite une industrialisation rapide, la consommation énergétique mondiale a été dominée par le charbon, que le XX^e siècle a été l'ère du pétrole, et que le siècle actuel sera celui des énergies renouvelables. Les deux premières opinions sont fausses, la troisième discutable.

Même avec l'essor des machines industrielles, le charbon n'était pas la source d'énergie dominante au XIX^e siècle. Le bois, le charbon de bois (à ne pas confondre avec le charbon – la houille –, qui est une roche sédimentaire) et les résidus de céréales (principalement de la paille) ont fourni 85 pour cent de l'énergie mondiale consommée pendant cette période – soit environ 2,4 yottajoules (un yottajoule, YJ en abrégé, vaut 10²⁴ joules).

Le charbon a commencé à représenter plus de cinq pour cent de l'énergie consommée vers 1840, et en 1900 il n'assurait encore que la moitié de la production. Cette augmentation de 5 à 50 pour cent a donc pris de 50 à 60 ans. Aux États-Unis, il fallut attendre 1885 pour que les combustibles fossiles (surtout du charbon, un peu de pétrole et une très faible quantité de gaz naturel) fournissent plus d'énergie que le bois et le charbon de bois. La bascule s'est produite en 1875 en France et en 1901 au Japon, mais seulement en 1930 en Union soviétique, en 1965 en Chine et à la fin des années 1970 en Inde.

De même, au XX^e siècle, la plus importante source d'énergie n'était pas le pétrole, mais le charbon. Ce dernier a culminé à environ 55 pour cent de la production énergétique mondiale au cours des années 1910. Le pétrole, déjà utilisé à cette époque, ne l'a dépassé qu'en 1964. Et comme ce déclin relatif s'est accompagné d'une augmentation constante de la demande mondiale d'énergie, le charbon a continué à être très utilisé. Finalement, c'est lui qui a fourni le plus d'énergie au XX^e siècle : environ 5,3 yottajoules, contre 4 yottajoules pour le pétrole.

Seuls deux pays importants sur le plan économique ont réalisé la troisième transition, celle du pétrole au gaz naturel. La

consommation de ce dernier a dépassé celle de pétrole brut en Union soviétique en 1984, et au Royaume-Uni en 1999.

Pour montrer que les transitions énergétiques sont lentes et progressives, j'ai étudié la vitesse à laquelle les sources d'énergie ont progressé, à partir du moment où elles atteignaient cinq pour cent du bouquet global. Les trois transitions successives présentent des similitudes notables (voir l'encadré ci-dessous). Ainsi, de 1840 à 1900, la part du charbon a évolué à une vitesse voisine de celle du pétrole entre 1915 (année où il a atteint cinq pour cent) et 1975. Le gaz naturel a fourni cinq pour cent de l'énergie mondiale vers 1930 et devrait bientôt en représenter 33 pour cent. Des trois combustibles, c'est celui qui a pris le plus de temps pour atteindre 25 pour cent de la consommation énergétique : environ 55 ans, contre 35 ans pour le charbon et 40 ans pour le pétrole.

Bien sûr, les trois séquences ne permettent pas de déduire le rythme des transitions énergétiques futures. Et la transition suivante pourrait être accélérée par une percée technologique vers une énergie nucléaire sûre et bon marché ou vers un dispositif de stockage massif de l'énergie d'origine éolienne ou solaire.

Deux ou trois générations pour une transition

Cependant, le fait que les trois premières transitions énergétiques se soient effectuées à un rythme similaire est remarquable, en particulier parce que les techniques d'extraction, les canaux de distribution et les machines utilisatrices (tel un moteur de train) varient notablement d'un combustible à l'autre. À l'échelle mondiale, les investissements et les infrastructures nécessaires pour qu'une nouvelle source

d'énergie s'impose requièrent deux à trois générations, soit 50 à 75 ans.

Jusqu'ici, les énergies renouvelables suivent la même évolution lente. En 2011, elles ont fourni 9,4 pour cent de l'énergie consommée par les États-Unis, qui était d'environ 103×10^{18} joules. Les énergies renouvelables classiques ont représenté six pour cent, répartis entre les centrales hydroélectriques (3,25 pour cent), le bois (2 pour cent, essentiellement des déchets issus d'opérations de débitage), et, pour une part modeste, la biomasse et la géothermie.

Les « nouvelles » énergies renouvelables n'ont fourni que 3,35 pour cent du total, avec des parts respectives de 2, 1,19 et 0,16 pour cent pour les biocarburants liquides, l'éolien et le solaire. Dans les pays industrialisés, ces trois dernières sources devront assurer la quasi-totalité de la croissance des énergies renouvelables, car le potentiel des autres, en particulier

DES TRANSITIONS QUI DEMANDENT DES DÉCENNIES

Chaque source d'énergie qui a dominé l'approvisionnement mondial a mis 50 à 60 ans pour parvenir à son point culminant. Le charbon a atteint cinq pour cent de l'approvisionnement mondial en 1840 (en bas à gauche) et a progressivement pris le pas sur le bois : environ 60 ans plus tard, vers 1900, il représentait la moitié de la consommation énergétique. Lors des transitions suivantes, les parts du pétrole et du gaz naturel ont augmenté de façon voisine après avoir

passé la barre des cinq pour cent. Le pétrole n'a pas encore atteint 50 pour cent et n'y parviendra peut-être jamais. La part du gaz naturel évolue encore et augmente plus lentement. Les sources modernes d'énergie renouvelable – l'éolien, le solaire et les biocarburants liquides – ne représentent qu'environ 3,4 pour cent du total. À moins d'une rupture technologique ou politique, la transition vers ces énergies devrait, elle aussi, être longue.

