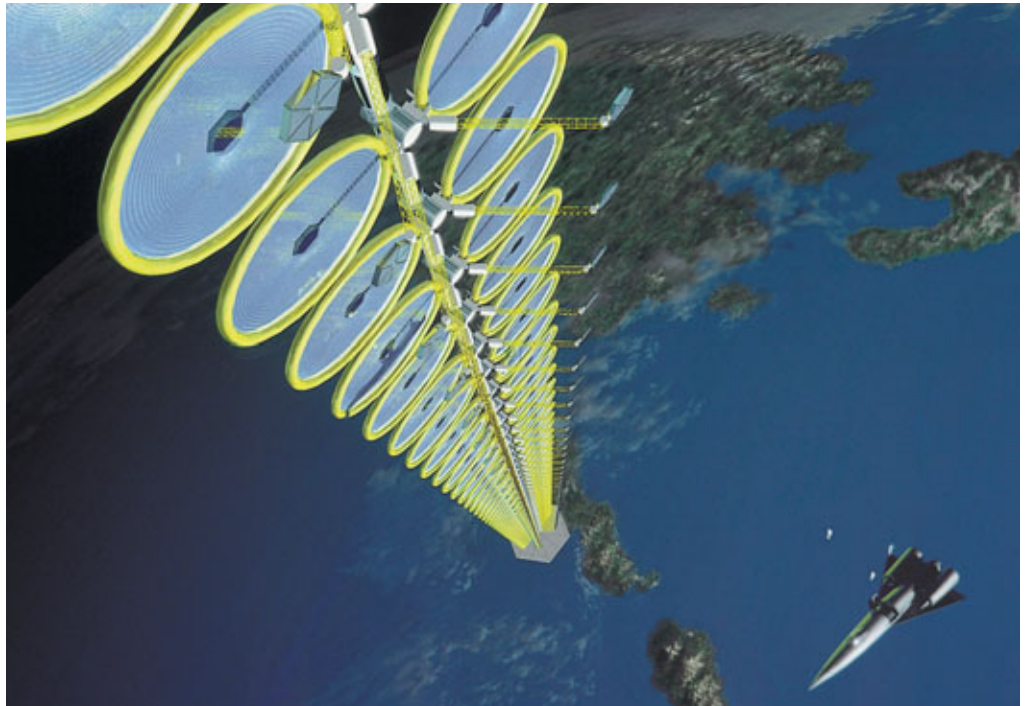


Ruptures technologiques et énergie : science-fiction ou anticipation ?

Dans le domaine énergétique, une rupture technologique peut avoir des conséquences sociales et économiques considérables. Ce serait, entre autres, le cas de réelles percées concernant le stockage de l'énergie.

Projet Nasa de centrale solaire orbitale. Lancée à la fin des années soixante, l'idée d'envoyer sur Terre par micro-ondes l'énergie solaire collectée par d'immenses panneaux de cellules se concrétisera-t-elle au XXI^e siècle ?



Pat Rawlings/CIEL & ESPACE

En science, en technique ou en économie, la prédiction à long terme est difficile sinon impossible. Il en est d'ailleurs mieux ainsi, les découvertes inattendues étant souvent les plus intéressantes ! La simple extrapolation à un futur proche est dangereuse. Faut-il rappeler qu'au moment du premier choc pétrolier, dans les années 70, les économistes avaient prévu, pour la fin du XX^e siècle, une consommation électrique de la France bien supérieure à ce qu'elle est ? Même s'il est intéressant de faire des prévisions ou d'envisager des scénarios, la réalité est souvent tout autre. D'imprévisibles ruptures technologiques ou scientifiques peuvent profondément modifier l'évolution de la société et avoir une influence très importante sur notre vie quotidienne : cela a été le cas de la découverte du transistor, du laser, de l'énergie nucléaire, etc. Imaginer une telle rupture est plus difficile qu'extrapoler : il faut prévoir ce qu'elle peut être et quand elle peut se produire. Personne n'aurait prédit il y a vingt ans qu'il serait maintenant possible de déplacer des atomes un à un. Et si Jules Verne a bien imaginé que l'homme irait sur la Lune, la concrétisation de cette idée a pris beau-

coup de temps. Envisager certaines ruptures technologiques dans le domaine de l'énergie et l'influence qu'elles pourraient avoir a donc juste pour but de faire réfléchir, et pourra relever plus de la science-fiction que de l'anticipation.

Pas de source universelle

L'énergie est un domaine complexe dans lequel entrent des facteurs scientifiques, économiques, politiques et environnementaux. Il n'y a pas de solution universelle pour l'approvisionnement énergétique d'un pays. Il serait souhaitable que la satisfaction de chaque besoin soit l'objet d'une optimisation en fonction des ressources disponibles, de leur prix et de leur impact sur l'environnement. Diversifier les sources contribue d'autre part à assurer une certaine stabilité des prix ainsi qu'une sécurité d'approvisionnement.

En plus de celles qui sont actuellement accessibles, un certain nombre de sources d'énergie peuvent être imaginées pour le long terme, à commencer par la fusion thermonucléaire contrôlée (voir *Perspectives éner-*

gétiques à très long terme). D'autres pourraient devenir exploitables un jour bien qu'aujourd'hui très éloignées de la rentabilité économique, comme l'énergie des vagues ou celle tirée de la différence de température entre la surface et les profondeurs de l'océan. C'est également le cas du photovoltaïque spatial : des cellules satellisées seraient orientées en permanence vers le Soleil, l'énergie produite étant transférée sur Terre, avec un rendement de l'ordre de 50 %, par des faisceaux de micro-ondes.

Une rupture technologique peut permettre d'abaisser fortement les coûts d'une source donnée et la rendre compétitive. Ce pourrait être par exemple le cas du photovoltaïque terrestre. Actuellement, le prix du kWh produit, près de dix fois supérieur à celui obtenu avec des combustibles fossiles ou le nucléaire, ne le rend intéressant que dans des situations particulières, comme les sites isolés. S'il était possible de fabriquer des cellules photovoltaïques fournissant un kWh à un prix compétitif ou même inférieur à celui produit par d'autres sources d'énergie, elles joueraient un rôle important dans la production d'électricité. Les prix diminuent régulièrement mais

la compétitivité économique est encore lointaine. Elle nécessite une rupture technologique qui pourrait venir de cellules organiques réalisées par sérigraphie ou de couches minces minérales peu coûteuses à fabriquer. Si elles ne se limitent pas à injecter l'électricité produite dans le réseau, les cellules ne sont qu'un des composants d'un système photovoltaïque autonome dont elles ne représentent que le tiers du prix. Les batteries, indispensables pour le stockage et l'utilisation lorsqu'il n'y a pas de soleil, en sont également un élément important. Toute avancée réduisant les coûts des cellules et augmentant les performances du stockage serait donc bénéfique.

L'inconvénient actuel de l'utilisation des énergies fossiles est qu'elle accroît l'effet de serre, ce qui pourrait modifier le climat de façon importante (encadré A, *L'effet de serre*). Il y a déjà eu des variations de la teneur en gaz carbonique au cours des âges : ce n'est pas tant cette variation qui est importante que la rapidité avec laquelle elle se produit par suite de l'intervention humaine. Si elle est lente, comme cela s'est vu dans le passé, la nature a le temps de s'adapter. Si elle est rapide, ce qui semble être le cas actuellement, la nature risque d'être profon-

dément perturbée. Il y a deux manières extrêmes d'éviter cette augmentation anthropique de l'effet de serre. La première est de réduire l'émission, en optimisant les systèmes utilisateurs (les voitures émettent par exemple de moins en moins de CO₂), en diminuant les besoins, notamment par l'utilisation des transports en commun, ou en utilisant des énergies émettant moins de gaz à effet de serre, lorsque cela est possible. La seconde est de piéger les gaz émis en les transformant en une espèce non polluante, un solide par exemple, ou en les séquestrant dans le sous-sol, solution en cours d'étude. Le problème est ardu pour les émissions dispersées. Si des technologies de piégeage existaient à un coût acceptable, il est clair que le problème de l'utilisation des énergies fossiles se poserait différemment.

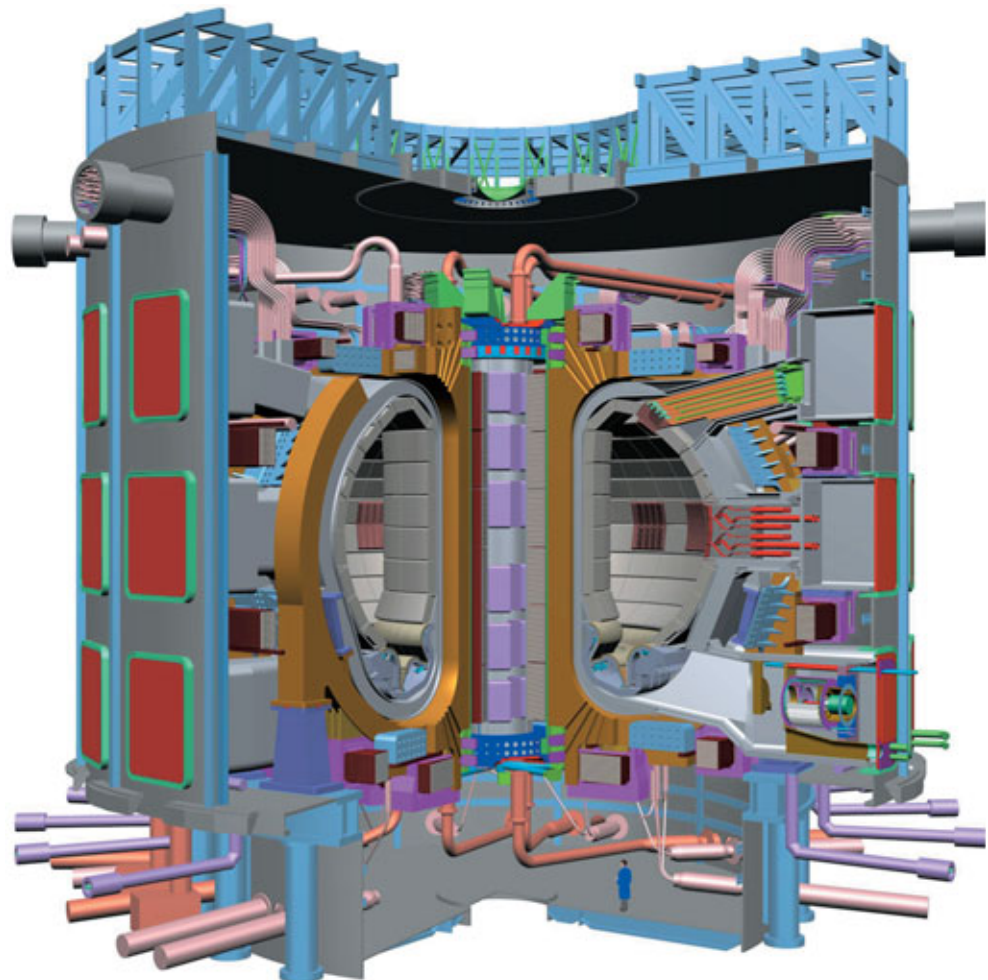
Le stockage : le vrai point faible

L'hydrogène apparaît comme le vecteur énergétique de l'avenir (voir *Les promesses de l'hydrogène*). Aux voies classiques de production, il faut ajouter celle, plus futuriste, des hydrogénases (voir *Produire de l'hydrogène*

à partir d'eau et de lumière grâce aux micro-organismes). Actuellement, le vecteur le plus utilisé est bien sûr l'électricité (d'ailleurs nécessaire à la production d'hydrogène). Malheureusement il est difficile de la stocker en grande quantité et il faut immédiatement l'utiliser. Deux ruptures technologiques permettraient d'optimiser son utilisation.

La première concerne le transport, lors duquel se perd une quantité non négligeable d'électricité. Ces pertes pourraient être diminuées par l'utilisation de supraconducteurs à haute température, une solution qui n'est pas encore économiquement intéressante. La seconde intéresse le stockage, sans contester le point faible actuel du domaine de l'énergie. Actuellement, le seul "stockage" de grande capacité consiste à faire remonter l'eau dans les barrages. De nouveaux moyens de stockage ou une amélioration substantielle de la technologie permettraient de produire et d'utiliser l'énergie différemment. S'il était possible d'avoir des batteries électrochimiques (ou autres) ayant une capacité massique supérieure d'un facteur 10 à ce qui existe actuellement et à un coût compétitif, la voiture électrique pourrait être une réalité et son autonomie serait supérieure à celle des

Vue du réacteur thermonucléaire expérimental international ITER dans sa version économique ITER-FEAT.



ITER

véhicules actuels. La pollution des transports serait bien moindre et le coût du kilomètre parcouru plus faible. Ce type de batterie pourrait aussi être utilisé dans l'habitat individuel. L'énergie serait stockée pendant certaines heures, programmées, puis utilisée tout au long de la journée, ce qui permettrait d'atténuer les effets de pointe de production en lissant la consommation d'électricité.

Un autre moyen de stocker l'énergie serait sous forme d'antimatière (voir *Perspectives énergétiques à très long terme*). Toutefois, dans l'état actuel de la recherche il faut fournir infiniment plus d'énergie pour produire de l'antimatière que ce que l'on peut ensuite récupérer. De plus son stockage dans des bouteilles magnétiques consomme aussi de l'énergie. Même si l'on est capable de stocker de l'énergie sous cette forme, se posera le problème de sa récupération car l'annihilation de matière et d'antimatière donne, en particulier, des photons très énergétiques.

Un stockage de type "nucléaire" ?

L'énergie libérée dans les réactions chimiques élémentaires correspondant à la combustion de pétrole, de gaz ou de charbon se chiffre en électronvolts (eV). L'énergie mise en jeu dans les réactions nucléaires se chiffre en méga-électronvolts (MeV), soit un million de fois plus. Il est donc possible de produire, pour la même masse, de l'ordre de 1 million de fois plus d'énergie avec l'énergie nucléaire. Le stockage d'énergie par l'intermédiaire de réactions électrochimiques se

chiffre également en eV pour les réactions élémentaires. La question est de savoir si un stockage de type "nucléaire" est concevable. Cela représenterait une rupture technologique d'un intérêt majeur dans le domaine de l'énergie. La réponse pourrait venir de certains noyaux qui possèdent des états **isomériques** situés à quelques MeV au-dessus de l'état fondamental. Ainsi, le noyau de hafnium 178 a une période de 36 ans dans un état situé à 2,4 MeV de l'état fondamental. Le rhénium 198 a une durée de vie de 300 000 ans et serait susceptible de stocker 1 terajoule par litre pendant plusieurs milliers d'années ! Le problème est que si l'on sait actuellement stocker cette énergie, on ne sait pas la récupérer à la demande. Il faudrait pour cela être capable de moduler la période du noyau excité. Si c'était le cas, on pourrait essayer de généraliser le processus à d'autres excitations nucléaires. Le problème des déchets nucléaires serait résolu puisqu'il suffirait de moduler la période de leurs noyaux pour transformer ceux qui sont à vie longue en noyaux à vie courte. Des choses impossibles pour une génération de physiciens ne sont-elles pas devenues possibles pour la ou les suivantes ?

Les économies : oui, mais...

Les économies d'énergie abaissent la consommation correspondant à un service rendu. Elles génèrent aussi, parfois, la possibilité de satisfaire d'autres besoins et donc de consommer autant. Un rapport du Commissariat du plan a ainsi montré que si les voi-

tures à moteur diesel consomment moins que celles à essence, leurs conducteurs en profitent pour rouler plus : l'économie globale est pratiquement nulle. Pour les économies d'énergie, l'électronique, qui a un rôle capital à jouer dans l'optimisation de notre consommation, est encore insuffisamment employée à cet effet. Les circuits intégrés constituent, et de loin, le plus bel exemple d'économie d'énergie tout en offrant des performances de plus en plus élevées. Enfin, des économies considérables pourraient être faites dans le domaine des affaires s'il était possible de réaliser un environnement virtuel reconstituant de manière réaliste une réunion. Le télétravail devrait aussi permettre de réduire les déplacements et donc d'économiser de l'énergie.

Ruptures et progrès

Bien qu'il soit difficile de prédire une rupture technologique et ses conséquences, il ne faut pas négliger l'effet profondément perturbateur qu'elle peut avoir. L'introduction des calculatrices électroniques, qui a sonné le glas des règles à calcul et des livres de tables numériques, illustre parfaitement ce mécanisme. De la richesse est ici alors que la pauvreté s'installe ailleurs. Il semble que ce soit toujours ainsi qu'avance le progrès, chaque rupture conduisant à une crise et à un accroissement de richesse au niveau global. ●

Christian Ngô

Direction de la recherche technologique
CEA/Fontenay-aux-Roses

Perspectives énergétiques à très long terme

Au-delà de ce qui est parfois abusivement qualifié d'énergies nouvelles, la recherche la plus fondamentale laisse entrevoir pour un avenir hypothétique et en tout cas très lointain des sources d'énergies "exotiques" faisant notamment appel à l'antimatière. Entre-temps, il serait logique d'avoir fait appel à la surrégénération nucléaire, déjà maîtrisée, et à la fusion thermonucléaire contrôlée, dont les chercheurs espèrent qu'elle le sera avant la moitié du XXI^e siècle.

L'évolution extrêmement rapide des connaissances rend tout exercice de prospective lointaine en matière de solutions énergétiques très problématique. Songeons en effet que la grande majorité des scientifiques de toute l'histoire de l'humanité sont aujourd'hui vivants : cela donne une idée de l'extraordinaire accélération de la connaissance vécue par notre époque. Il est cependant possible de chercher à dégager quelques lignes directrices ou tout au moins pouvant illustrer des voies de recherche futures en matière d'énergie.

L'humanité utilise actuellement les ressources terrestres avec une belle avidité, sans sembler se préoccuper notablement de solutions à très long terme. Même si les réserves énergétiques fossiles sont sans doute aujourd'hui partiellement sous-estimées par les réserves *prouvées*, il n'en reste pas moins que, dans un petit nombre d'années, elle assistera à une réduction drastique du nombre de pays producteurs de pétrole et, même si les incertitudes sont là plus grandes, sans doute également de gaz naturel. La recherche de sources durables et accessibles d'énergie constitue donc sans doute l'un des objectifs majeurs qu'elle

doit poursuivre. Aujourd'hui, plusieurs solutions en ce sens existent ou apparaissent réalisables moyennant une extrapolation raisonnable des connaissances.

Surrégénération et fusion

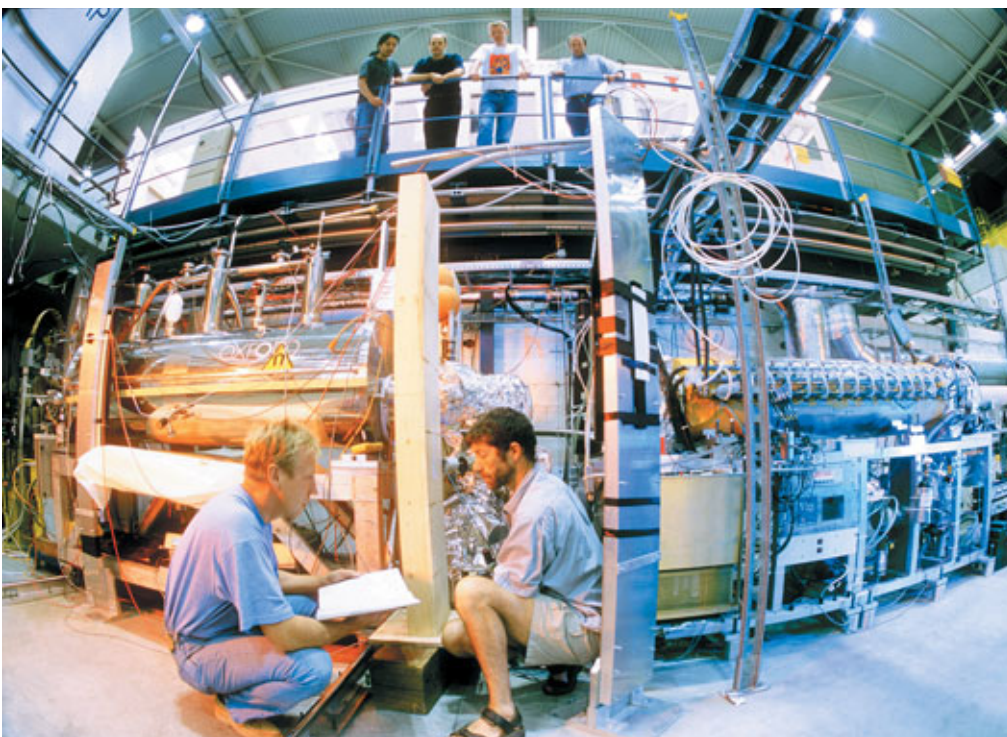
La première de ces solutions concerne la surrégénération que nous devons envisager si nous voulons disposer d'une indépendance énergétique qui puisse s'étendre à une durée de l'ordre du millénaire. Paradoxalement, la surrégénération, sujet politico-écologique sensible, semble aujourd'hui nécessaire si l'on veut exploiter *écologiquement* les ressources de matériaux radioactifs qui sont présentes sur terre. Une deuxième ligne de recherche pourrait être offerte par la fusion thermonucléaire contrôlée, sans aucun doute la source d'énergie du futur. Ses réserves de matière première sont considérables et se chiffrent en millions d'années. Cette solution très ambitieuse – réaliser un soleil miniature dans un environnement maîtrisé – a nécessité, et nécessitera sans doute encore, les efforts de plusieurs générations de physi-

ciens et d'ingénieurs avant de déboucher sur une solution viable de production d'énergie.

Par-delà ces solutions relativement conventionnelles que constituent surrégénération et fusion, il faut rester ouvert à l'idée que la source d'énergie de l'avenir puisse mettre en jeu des solutions radicalement nouvelles. Plus encore que les solutions prospectives précédentes, déjà assez incertaines, les exemples envisagés dans la suite ne peuvent à l'évidence être qu'illustratifs.

L'espoir d'une conversion complète en énergie

L'annonce récente par le CERN, laboratoire européen de la physique des particules, de la mise en service de l'*Antiproton Decelerator* (AD), qui ralentit et refroidit les particules au lieu de chercher à les accélérer, a donné lieu à quelques extrapolations hardies quant aux utilisations finales possibles que pourrait présenter l'antimatière. Cependant, par rapport aux combustibles classiques, et même nucléaires, le rendement de production d'énergie lors de sa rencontre avec la matière est



CERN



L'expérience Athena de production d'antimatière (antihydrogène) au CERN, près de Genève. Les antiprotons venant du décélérateur d'antiprotons sont capturés dans l'aimant supraconducteur (à g.). L'accélérateur de positons (à dr.) fournit les positons.



optimal car la conversion en énergie est complète, alors qu'un combustible nucléaire ne convertit qu'une toute petite fraction de sa masse en énergie. Dans le domaine des applications spatiales, par exemple, la maîtrise d'une telle source compacte d'énergie constituerait un immense progrès. Mais nous sommes à l'évidence encore très loin de l'époque de *Star Trek* dont le vaisseau spatial est propulsé (à une vitesse supérieure à celle de la lumière !) par un réacteur à antimatière. Le CERN, dont la consommation d'énergie représente une fraction appréciable de celle de la ville de Genève, n'a en définitive réussi à produire au cours de son existence que moins d'un microgramme d'antimatière, ce qui montre l'ampleur de la tâche qui reste à accomplir. En effet l'antimatière, n'existant pas à l'état naturel dans notre monde, ne peut pas constituer directement une source d'énergie. En revanche, elle pourrait être utilisée pour stocker de l'énergie (voir *Ruptures technologiques et énergie : science-fiction ou anticipation ?*).

Un catalyseur pour passer de la matière à l'antimatière ?

Cependant, les physiciens des particules s'attachent à comprendre quels sont les processus permettant le "passage" entre matière et antimatière. La première de ces portes se trouve dans l'unification des forces fondamentales. Malheureusement, ce passage semble nécessiter un passage par une forme très coûteuse en énergie - les bosons messagers X et Y de la grande unification -, qui ralentit considérablement le processus de désintégration (heureusement

pour notre survie). Mais le physicien russe Valeri Rubakov a rapidement réalisé qu'une particule hypothétique, le monopole magnétique, permettrait de catalyser et d'accélérer de façon fantastique le passage entre matière et antimatière. Si nous savions produire un tel catalyseur - ce dont nous sommes totalement incapables aujourd'hui - nous disposerions d'une source pratiquement infinie d'énergie, qui permettrait de transformer à volonté des échantillons de matière en antimatière.

Trous noirs et énergie du vide

Un deuxième exemple d'une conversion totale de la matière en énergie est donné par l'émission thermique par des trous noirs de faible masse. Suggérée en 1972 à Princeton par le physicien israélien Jacob Bekenstein, et démontrée théoriquement en 1974 par Stephen Hawking à Cambridge, cette émission pourrait n'apparaître que comme une curiosité intellectuelle. Imaginons cependant que l'on parvienne à faire s'effondrer sous l'effet de sa gravité un objet de la taille d'une montagne (environ 10^{15} kilogrammes de matière). Un trou noir possédant une telle masse émettrait un rayonnement thermique extrêmement intense, d'une puissance d'une dizaine de gigawatts thermiques, et cela sans déchets nucléaires car l'émission se ferait sous forme de rayonnement gamma ! Cette puissance, équivalente à celle d'une dizaine de centrales nucléaires, serait émise jusqu'à ce que le mini trou noir finisse par se consumer, après un temps très supérieur à l'âge actuel de l'Univers !

Si ce type de solution apparaît encore aujourd'hui comme une extrapolation osée de la physique prédite par nos équations, il est important de se rappeler que la célèbre équation $E = Mc^2$ d'Einstein était également considérée initialement comme une relation théorique qui n'aurait *a priori* aucune application concrète. De même, comment imaginer aujourd'hui maîtriser la microélectronique sans comprendre le comportement quantique des solides et les distributions apparemment ésotériques de Fermi-Dirac ? De la même façon, nous ne disposons pas encore aujourd'hui d'une compréhension complète et satisfaisante de l'origine de la masse des particules, et nous ne savons pas déterminer si ce que nous appelons le "vide" ne recèle pas en fait une source d'énergie pratiquement infinie du fait que ce "vide" serait en fait **métastable**. Comprendre cette notion d'énergie du vide et celle de la génération des masses de particules représente donc l'un des objectifs majeurs de la physique subnucléaire, d'autant que l'année 1998 a vécu une surprise de taille dans la mise en évidence expérimentale de ce qui apparaît comme une répulsion gravitationnelle à grande distance.

Il n'est pas question ici de proposer des exemples actuellement réalisables de solutions énergétiques, mais plutôt d'insister sur le fait que l'indépendance énergétique à long terme d'un pays ainsi que sa capacité à innover dans ce domaine peuvent dépendre de façon cruciale du renforcement de son effort de recherche et développement. ●

Gabriel Chardin

Direction des sciences de la matière
CEA/Saclay