

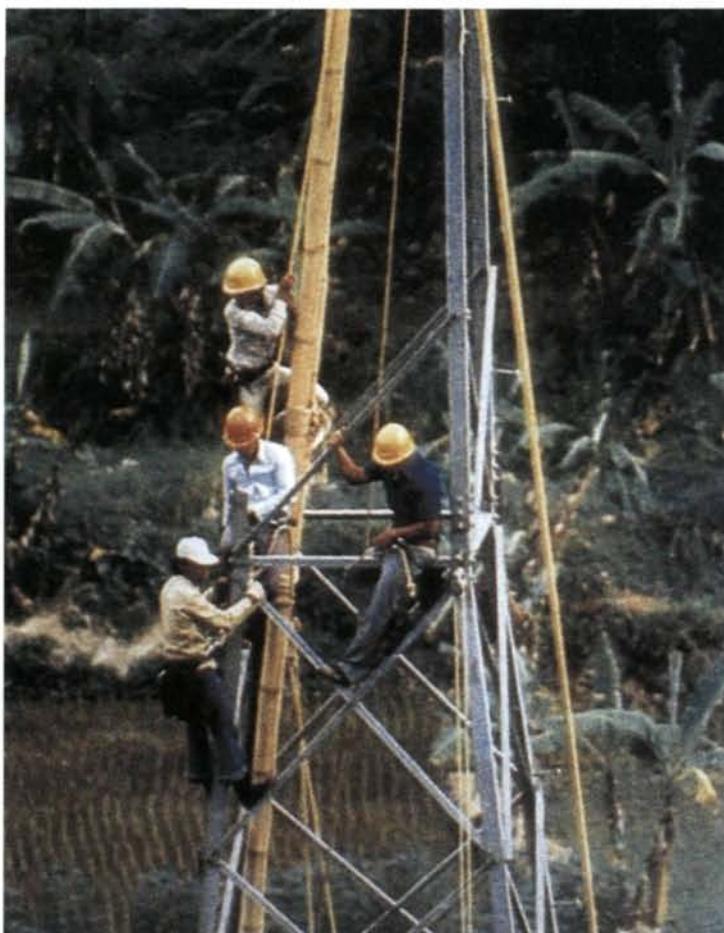
# DE LA NÉCESSITÉ DE L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

## UN POINT DE VUE SUR L'EXALTANT AVENIR ÉNERGÉTIQUE DE LA PLANÈTE

RICHARD RHODES ET DENIS BELLER

**L**e monde a besoin de plus d'énergie. L'énergie démultiplie la main d'œuvre, accroissant la productivité. Elle permet de construire et d'éclairer des écoles, de purifier l'eau, de faire fonctionner les machines agricoles, les machines à coudre et les robots d'assemblage, et de stocker et de transmettre des informations. La population mondiale ne cesse d'augmenter, ayant dépassé les six milliards d'individus en 1999. Or, un tiers d'entre eux – soit deux milliards – n'ont pas accès à l'électricité. Le développement dépend de l'énergie; l'absence de développement, c'est la souffrance, la pauvreté, la maladie et la mort. Ces problèmes sont une source d'instabilité et risquent de dégénérer en violence généralisée. C'est pourquoi les pays développés soucieux de leur sécurité nationale doivent aider leurs voisins en développement plus densément peuplés à accroître leur production d'énergie. Dans un souci tant de sûreté que de sécurité, cette offre accrue d'énergie devrait provenir de différentes sources.

“Au niveau mondial”, estime la British Royal Society and Royal Academy of Engineering dans un rapport sur l'énergie nucléaire et les changements climatiques publié en 1999, “nous devrions voir notre consommation d'énergie au moins doubler dans les 50 prochaines années et jusqu'à quintupler au cours des 100 prochaines



années à mesure que la population mondiale augmentera et que les individus aspireront à améliorer leur niveau de vie”. Même avec de

vigoureuses mesures d'économie d'énergie, la production mondiale d'énergie devrait tripler, d'ici à 2050, pour soutenir une consom-

*M. Rhodes est l'auteur de The Making of the Atomic Bomb, Dark Sun et d'autres ouvrages. M. Beller est ingénieur nucléaire et technicien au Laboratoire national de Los Alamos (États-Unis). Le présent article s'inspire de l'essai publié par les auteurs dans Foreign Affairs, Vol. 70, N° 1 (Janvier/février 2000) et est publié ici avec la permission du New York Times Syndicate.*

*Photo : Entretien de lignes électriques en Indonésie (Crédit : PNUD).*

mation équivalant à un tiers seulement de la consommation actuelle des États-Unis par habitant. L'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) prévoit, d'ici à 2020, une croissance de 65% de la demande mondiale d'énergie, deux tiers de cette demande émanant de pays en développement.

"Étant donné les futurs niveaux probables de consommation", avertit la Royal Society and Royal Academy, "il sera extrêmement difficile de satisfaire la demande mondiale d'énergie sans endommager durablement et dangereusement l'environnement". Parmi ces dommages, on peut citer la pollution des sols et de l'air, et le réchauffement planétaire.

## UNE RUPTURE FRANCHE VERS L'AVENIR

Actuellement, dans le monde, l'énergie provient essentiellement du pétrole (39%), du charbon (24%), du gaz naturel (22%), de l'hydroélectricité (6,9%) et du nucléaire (6,3%). Même si le pétrole et le charbon continuent de dominer, leur part de marché décline depuis plusieurs décennies. Pendant ce temps, la part du gaz naturel et du nucléaire ne cesse d'augmenter, et cette augmentation devrait se poursuivre.

Contrairement aux affirmations des organisations antinucléaires, l'énergie nucléaire n'est ni morte ni mourante. La France produit environ 75% de son électricité grâce au nucléaire; la Belgique, 58%; la Suède, 47%; la Suisse, 36%; le Japon, 36%; l'Espagne, 31%; le Royaume-Uni, 29%; et les États-Unis (premier producteur mondial d'énergie nucléaire), 20%. La République de Corée et la Chine ont annoncé avoir conçu des plans ambitieux de développement de leur infrastructure nucléaire – la Corée en construisant 16 nouvelles centrales,

accroissant ainsi sa capacité de plus de 100%. Avec 433 réacteurs en service dans le monde, l'énergie nucléaire satisfait les besoins annuels en électricité de plus d'un milliard d'individus.

Aux États-Unis et dans le monde, la sûreté et le rendement du nucléaire se sont considérablement améliorés depuis 1990. En 1998, puis en 1999, le coefficient d'utilisation (pourcentage de la capacité d'une centrale que celle-ci produit) des réacteurs opérationnels a atteint des records. En 1999, le coefficient d'utilisation moyen était, aux États-Unis, de 85% pour environ 100 réacteurs, contre 58% en 1980 et 66% en 1990. Malgré la réduction du nombre de centrales, l'industrie nucléaire américaine a produit, en 1999, 9% d'électricité de plus qu'en 1998. Le coût moyen de production, pour l'énergie nucléaire, n'est actuellement que de 1,9 cent par kilowatt-heure (kWh), tandis que l'électricité produite à partir de gaz coûte 3,4 cents par kWh.

Rien qu'en améliorant sa capacité et sa performance, l'industrie nucléaire a été l'industrie américaine qui a le plus contribué à satisfaire l'engagement pris par les États-Unis, en vertu du Protocole de Kyoto, de limiter les émissions de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Pendant ce temps, l'irradiation des travailleurs et les volumes de déchets produits par unité d'énergie ont été ramenés à des niveaux extrêmement faibles.

Les technologies importantes et complexes mettant plus d'un demi-siècle pour se propager dans le monde, le gaz naturel dominera, avec l'énergie nucléaire, la production d'énergie pendant les cent prochaines années. Reste à déterminer lequel des deux secteurs maîtrisera la plus grande part. Cependant, tous deux sont plus propres et plus sûrs que les combustibles qu'ils ont commencé à

remplacer, et leur progression devrait être soutenue.

Même les écologistes devraient se féliciter de cette transition et reconsidérer leur engouement pour les sources d'énergie renouvelables.

## ÉNERGIE À BASE DE CARBONE

Parmi les sources de production d'électricité, le charbon est le pire polluant de l'environnement (le pétrole, qui est actuellement la principale source d'énergie, assure le fonctionnement des transports, ce qui le place dans une catégorie distincte). De récentes études réalisées par la Harvard School of Public Health font apparaître que les polluants émis par la combustion du charbon entraînent chaque année environ 15 000 décès prématurés aux seuls États-Unis. Utilisée pour produire environ un quart de l'énergie primaire mondiale, la combustion du charbon émet des quantités de déchets toxiques trop importantes pour pouvoir être maîtrisées en toute sûreté. Ces déchets sont soit dispersés directement dans l'air, soit solidifiés et mis en décharge. Certains sont même mélangés à des matériaux de construction.

Outre qu'elles émettent des substances chimiques nocives sous forme de gaz ou de particules toxiques – oxydes de soufre et d'azote (composants des pluies et brouillards acides), arsenic, mercure, cadmium, sélénium, plomb, bore, chrome, cuivre, fluor, molybdène, nickel, vanadium, zinc, monoxyde et dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre –, les centrales à charbon sont également, dans le monde, la principale source de rejets radioactifs dans l'environnement. De l'uranium et du thorium, éléments légèrement radioactifs omniprésents dans la croûte terrestre, s'échappent lors de la combustion du charbon. Du radon radioactif, produit par la

décomposition de l'uranium de la croûte terrestre et normalement confiné dans le sous-sol, s'échappe lors de l'extraction du charbon. Une centrale à charbon de 1000 mégawatts-électriques (MWe) émet 100 fois plus de radioactivité dans l'environnement qu'une centrale nucléaire de puissance comparable. Dans le monde, les rejets d'uranium et de thorium provenant de la combustion du charbon s'élèvent à environ 37 300 tonnes par an, dont environ 7300 tonnes imputables aux États-Unis. L'uranium et le thorium étant de puissants combustibles nucléaires, la combustion du charbon gaspille également plus d'énergie potentielle qu'elle n'en produit.

Les déchets radioactifs ignorés qui sont produits par la combustion du charbon mettent en évidence le contexte politique défavorable dans lequel opère l'industrie nucléaire. Les législations actuelles obligent les centrales nucléaires, à la différence des centrales à charbon, à investir dans des systèmes onéreux de réduction des rejets radioactifs. Aux États-Unis, le combustible nucléaire n'est pas efficacement recyclé en raison des craintes de prolifération. Ces facteurs ont perverti l'économie du développement nucléaire et créé un problème d'évacuation des déchets politiquement difficile à gérer. Si les centrales à charbon étaient contraintes d'engager les mêmes dépenses, l'électricité produite à partir de charbon ne serait pas plus économique que celle produite par le nucléaire.

## **ÉNERGIES RENOUVELABLES : DES RÉALITÉS CHANGEANTES**

Les sources d'énergie renouvelables – hydroélectricité, énergies solaire, éolienne et géothermique, et biomasse – se caractérisent par des coûts d'investissement élevés et

ont sur l'environnement des répercussions importantes rarement admises officiellement. L'hydroélectricité n'est même pas une véritable source d'énergie renouvelable, car les barrages finissent par s'envaser. La plupart des sources d'énergie renouvelables captent une énergie extrêmement diluée qui, pour être concentrée, nécessite de vastes terrains et d'un grand nombre de capteurs. La fabrication des capteurs solaires, le béton utilisé pour fixer les éoliennes et la submersion de nombreux hectares de terres en amont des barrages endommagent et polluent l'environnement.

Les cellules photovoltaïques utilisées pour capter les rayonnements solaires sont de vastes semi-conducteurs; leur fabrication produit des déchets toxiques (métaux et solvants) dont l'évacuation nécessite des technologies spéciales. Une centrale électrique solaire de 1000 MWe produirait, du fait du seul traitement des métaux, 6850 tonnes de déchets dangereux sur une durée de vie de 30 ans. Une centrale thermique solaire comparable (utilisant des miroirs orientés vers une tour centrale) nécessiterait, pour sa construction, des métaux qui produiraient 435 000 tonnes de résidus, dont 16 300 tonnes seraient contaminés par le plomb et le chrome et seraient jugés dangereux.

Un système énergétique solaire mondial consommerait au moins 20% des ressources en fer connues de la planète. Il faudrait un siècle pour le construire et son entretien nécessiterait une proportion considérable de la production annuelle mondiale de fer. L'énergie nécessaire pour fabriquer suffisamment de capteurs solaires pour couvrir 1 300 000 km<sup>2</sup> de surface terrestre et acheminer l'électricité par des lignes à longue distance aggraverait considérablement, à elle seule, la pollution et les émissions de gaz à effet de serre dans le monde. Un

système énergétique solaire mondial non secondé par des centrales à combustible fossile ou nucléaires serait par ailleurs dangereusement vulnérable aux diminutions de rayonnements solaires dues à des phénomènes volcaniques tels que l'éruption survenue à Tambora en 1815, qui a rejeté dans l'atmosphère 40 kilomètres cubes de cendres. Ces cendres ont considérablement réduit les rayonnements solaires pendant plusieurs années, ce qui s'est traduit par une mauvaise récolte généralisée pendant "l'année sans été" qui a suivi.

Les fermes éoliennes, outre qu'elles nécessitent des milliers de tonnes de béton et d'acier pour leur construction (d'où d'énormes quantités de résidus), sont inefficaces en raison de leur faible (car intermittent) rendement. Elles entraînent également une pollution visuelle et sonore et sont un véritable fléau pour les oiseaux. Plusieurs centaines d'oiseaux de proie, dont des dizaines d'aigles royaux, sont tués chaque année par chaque ferme éolienne de Californie; davantage d'aigles ont été tués par des turbines éoliennes que par la marée noire catastrophique de l'Exxon Valdez. La National Audubon Society a lancé une campagne visant à sauver le condor californien d'un projet de ferme éolienne devant être construite au nord de Los Angeles. Une ferme éolienne équivalente en production et en puissance à une centrale à combustible fossile ou nucléaire de 1000 MWe nécessiterait l'installation de plus de 4000 grandes éoliennes et occuperait entre plusieurs centaines et un millier de kilomètres carrés de terrain. En outre, même en bénéficiant d'importantes subventions et en ignorant le coût caché de la pollution, elle produirait de l'électricité à un coût double ou triple de celui de l'électricité d'origine fossile.

Bien qu'au moins un quart du potentiel hydroélectrique mondial

ait déjà été exploité, l'énergie hydroélectrique – produite par des barrages qui submergent de vastes terres, déplacent des populations rurales, modifient l'écologie des rivières, tuent les poissons et risquent un effondrement catastrophique – a, on le comprend, perdu ces dernières années le soutien des écologistes. La Banque américaine de financement du commerce extérieur a cédé en partie aux pressions écologistes lorsqu'elle a refusé de financer le projet chinois de barrage des Trois-Gorges, d'une puissance prévue de 18 000 MWe. La production d'énergie hydroélectrique peut en effet émettre davantage de gaz à effet de serre dans l'atmosphère que l'utilisation de combustibles fossiles, car elle entraîne une décomposition anaérobie de la végétation submergée dans l'eau retenue par les nombreux barrages, et le rejet d'importantes quantités de méthane, gaz à effet de serre plus nocif que le dioxyde de carbone.

Quant aux sources géothermiques – qui exploitent la chaleur interne de la Terre émergeant dans les régions de geysers ou sous les volcans –, elles sont intrinsèquement limitées et coïncident souvent avec des sites pittoresques (tel le parc national de Yellowstone, aux États-Unis), que les défenseurs des ressources naturelles souhaitent à juste titre protéger.

En raison de ces inconvénients, notamment, des organisations telles que le Conseil mondial de l'énergie et l'AIE prédisent que la production d'hydroélectricité ne représentera jamais plus de 6,9% (sa part actuelle) de l'offre d'énergie primaire mondiale, tandis que les autres sources d'énergie renouvelables, même fortement subventionnées, verront leur part actuelle de 0,5% passer tout au plus à 5-8% d'ici à 2020. Aux États-Unis, qui dominent la production mondiale d'électricité

provenant de sources renouvelables, cette production a en fait chuté de 9,4% entre 1997 et 1998 – l'hydroélectricité de 9,2%, l'énergie géothermique de 5,4%, l'énergie éolienne de 50,5% et l'énergie solaire de 27,7%.

Tout comme le rêve d'une fusion thermonucléaire maîtrisée, la réalité d'un monde fonctionnant grâce à une énergie propre émanant de sources renouvelables continue de s'estomper, et ce malgré des activités de recherche-développement coûteuses et fortement subventionnées. En 1997, l'investissement en recherche-développement, aux États-Unis, n'a été que de 5 cents par millier de kWh pour le nucléaire et le charbon, 58 cents pour le pétrole et 41 cents pour le gaz, contre plus de 4700 dollars pour l'énergie éolienne et 17 000 dollars pour la photovoltaïque. Cet investissement public massif dans les sources d'énergie renouvelables aurait été mieux dépensé à rendre les centrales à charbon et les automobiles plus propres.

D'après Robert Bradley, du Houston's Institute for Energy Research, les activités d'économie d'énergie et de mise en valeur des sources renouvelables non hydroélectriques ont bénéficié, sur 20 ans, d'un investissement cumulé de 30 à 40 milliards de dollars, soit "l'investissement énergétique public le plus important en temps de paix de l'histoire des États-Unis". En outre, Bradley estime que "les 5,8 milliards de dollars consacrés par le Département de l'énergie au subventionnement des énergies éolienne et solaire" auraient pu, à eux seuls, financer "le remplacement par des turbines à gaz à cycle combiné de 5000 à 10 000 MWe de capacité extrêmement polluante produite à l'aide de charbon, ce qui aurait réduit les émissions de dioxyde de carbone d'un à deux tiers". En remplaçant le charbon par le nucléaire, on aurait pu réduire encore davantage les émissions globales.

Malgré les investissements massifs, les activités d'économie d'énergie et de mise en valeur des sources renouvelables non hydroélectriques s'obstinent à ne pas être compétitives et ne contribuent que de façon marginale à l'offre d'énergie aux États-Unis. Si le pays le plus prospère du monde ne peut s'offrir ce luxe, qui peut ? Pas la Chine, évidemment, qui compte produire, en 2025, moins de 1% de son énergie commerciale à partir de sources d'énergie renouvelables non hydroélectriques. Cette année-là, le charbon et le pétrole continueront de former l'essentiel de l'offre énergétique chinoise, à moins que les pays développés n'incitent le pays le plus peuplé du monde à modifier ses plans.

## COMPARER LES CHOIX

Le gaz naturel présente, comme combustible, de nombreuses qualités par rapport au charbon ou au pétrole, et sa part dans la production mondiale d'électricité va certainement croître pendant la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Cependant, son offre est limitée et inégalement répartie; il est plus onéreux, comme source d'électricité, que le charbon ou l'uranium; et il pollue l'air. Une centrale au gaz naturel de 1000 MWe rejette, par jour, 5,5 tonnes d'oxydes de soufre, 21 tonnes d'oxydes d'azote, 1,6 tonne de monoxyde de carbone, et 0,9 tonne de matières sous forme de particules. Aux États-Unis, en 1994, la production d'électricité à partir de gaz naturel a généré environ 5,5 milliards de tonnes de déchets. Les incendies et les explosions dues au gaz naturel présentent également un risque important. Un kilomètre de gazoduc d'un mètre de diamètre soumis à une pression de 1000 livres par pouce carré (psi) contient l'équivalent de 660 tonnes d'énergie explosive; près de deux millions de

kilomètres de gazoducs de ce type entourent la Terre.

Le grand avantage de l'énergie nucléaire est son aptitude à extraire d'énormes quantités d'énergie d'un faible volume de combustible. La fission nucléaire, qui transforme la matière directement en énergie, est plusieurs millions de fois plus énergétique que la combustion chimique, qui ne fait que rompre les liens chimiques. Une tonne de combustible nucléaire produit une énergie équivalant à 2 à 3 millions de tonnes de combustible fossile. La combustion d'un kilogramme de bois de chauffe peut produire 1 kilowatt-heure d'électricité; 1 kg de charbon, 3 kWh; 1 kg de pétrole, 4 kWh. Par contre, 1 kg d'uranium, dans un réacteur moderne à eau ordinaire, produit 400 000 kWh d'électricité et, si cet uranium est recyclé, plus de 7 millions de kWh. Ces différences spectaculaires de volume aident à mieux comprendre l'énorme différence d'impact environnemental qui existe entre le nucléaire et les combustibles fossiles. L'exploitation d'une centrale électrique de 1000 MWe pendant un an nécessite 2000 wagons de charbon ou 10 superpétroliers, mais seulement 12 mètres cubes d'uranium naturel. De l'autre extrémité des centrales à combustible fossile, même celles équipées de dispositifs antipollution, s'échappent des milliers de tonnes de gaz nocifs, de particules et de cendres contenant des métaux lourds (et radioactifs), sans parler des dangereux déchets solides –

*\*Aujourd'hui, l'uranium est raffiné et transformé en combustible en utilisant l'énergie du charbon, ce qui bien entendu produit des polluants. Si l'énergie nucléaire pouvait être utilisée pour produire de la chaleur industrielle ou si les ensembles de combustible étaient recyclés, cette source de pollution serait éliminée ou fortement réduite.*

jusqu'à 500 000 tonnes de soufre provenant du charbon, plus de 300 000 tonnes provenant du pétrole, et 200 000 tonnes provenant du gaz naturel.

Par comparaison, une centrale nucléaire de 1000 MWe n'émet aucun gaz nocif ni aucun autre polluant\*, et une radioactivité par habitant nettement inférieure à celle produite par un voyage en avion, un détecteur de fumée domestique ou un poste de télévision. Elle produit environ 30 tonnes de déchets de haute activité (combustible irradié) et 800 tonnes de déchets de faible à moyenne activité – environ 20 mètres cubes en tout après compactage (en gros, le volume de deux automobiles). Toutes les centrales nucléaires en activité dans le monde produisent chaque année quelque 3000 mètres cubes de déchets. Par comparaison, l'industrie américaine produit chaque année environ 50 millions de mètres cubes de déchets solides toxiques.

Les déchets de haute activité sont, bien entendu, extrêmement radioactifs (les déchets de faible activité peuvent être moins radioactifs que la cendre de charbon utilisée pour fabriquer du béton ou du gypse, qui sont tous deux présents dans les matériaux de construction). Grâce à leur faible volume, cependant, et au fait qu'ils ne sont pas libérés dans l'environnement, ces déchets de haute activité peuvent être soigneusement confinés derrière de multiples barrières. Les déchets du charbon, dispersés dans la nature sous forme de fumée ou enfouis à faible profondeur, demeurent à jamais toxiques. Les déchets nucléaires radioactifs décroissent progressivement, perdant 99% de leur toxicité après 600 ans – délai tout à fait conforme aux limites de l'expérience humaine en matière de protection et d'entretien, comme en témoignent des

structures telles que le Panthéon de Rome et Notre-Dame de Paris.

Aux États-Unis, l'évacuation des déchets nucléaires pose un problème politique en raison de craintes généralisées sans commune mesure avec la réalité des risques. Ce n'est cependant pas un problème technique, comme le montrent des projets perfectionnés élaborés en France, en Suède et au Japon. L'Organisation mondiale de la santé a estimé que la pollution de l'air intérieur et extérieur cause chaque année quelque 3 millions de décès. En remplaçant de vastes quantités dispersées de déchets toxiques provenant de combustibles fossiles par de faibles volumes de déchets nucléaires correctement confinés, on obtiendrait une telle amélioration de la santé publique qu'il est étonnant que les médecins n'aient pas déjà exigé une telle conversion.

Le coût de production de l'électricité d'origine nucléaire produite par les centrales américaines existantes est déjà pleinement compétitif par rapport à celui de l'électricité produite au moyen de combustibles fossiles, même si l'électricité d'origine nucléaire produite récemment est un peu plus onéreuse. Cependant, ce prix plus élevé est trompeur. En effet, les grandes centrales nucléaires exigent des investissements plus importants que les centrales comparables à charbon et à gaz, uniquement parce que les exploitants nucléaires sont contraints de construire et de maintenir des systèmes coûteux de protection de l'environnement contre les rayonnements.

Si les centrales à combustibles fossiles étaient également tenues de confiner les polluants qu'elles produisent, elles coûteraient nettement plus que les centrales nucléaires. L'Union européenne et l'AIEA ont déterminé que "pour des quantités équivalentes d'énergie produite, les centrales à charbon et à pétrole, ... en raison de leurs émissions importantes et de

leurs énormes besoins en combustible et en moyens de transport, présentent les coûts externes les plus élevés et se soldent par un nombre équivalent de vies perdues. Les coûts externes sont environ dix fois plus élevés que pour une centrale nucléaire et peuvent représenter une partie non négligeable des coûts de production". En équivalent de vies perdues par gigawatt produit (perte d'espérance de vie due à l'exposition à des polluants), le charbon tue 37 personnes par an; le pétrole, 32; le gaz, 2; et le nucléaire, 1. Contrairement à l'énergie nucléaire, autrement dit, les combustibles fossiles (et les sources d'énergie renouvelables) ont bénéficié de la gratuité en matière aussi bien de protection de l'environnement que de santé et de sûreté publiques.

Même l'estimation d'une vie perdue du fait de l'énergie nucléaire est discutable. Une telle estimation dépend du fait de savoir si oui ou non, comme le prétend la vieille théorie du "non-seuil linéaire" (NSL), l'exposition à des doses de rayonnement nettement inférieures aux niveaux naturels préexistants accroît le risque de cancer. Cette théorie impose, pour l'exploitation des centrales nucléaires et l'évacuation des déchets qui en découlent, des systèmes perfectionnés et coûteux de confinement alors qu'il n'existe aucune preuve que l'exposition à des rayonnements de faible activité accroît le risque de cancer. En fait, il est prouvé que ce n'est pas le cas. Il est même prouvé que l'exposition à de faibles doses de radioactivité améliore la santé et allonge la durée de vie, probablement en stimulant, à l'instar des vaccins, le système immunitaire (la meilleure étude réalisée à ce sujet, qui portait sur les niveaux naturels de radon relevés dans des centaines de milliers de foyers de plus de 90% des comtés américains, a mis en évidence tant chez les fumeurs

que chez les non-fumeurs une nette diminution des taux de cancer du poumon à mesure qu'augmentaient les niveaux de radon). La faible radioactivité provenant des centrales nucléaires présente donc, dans le pire des cas, un risque négligeable. Les spécialistes de l'extraction et de la transformation du charbon avancent le même argument concernant la faible radioactivité provenant de sa combustion; une enquête réalisée par les services géologiques américains a conclu, par exemple, que "les éléments radioactifs présents dans le charbon et les cendres volantes ne devraient pas inquiéter". Or, le développement de l'énergie nucléaire a été entravé, et l'évacuation des déchets nucléaires inutilement retardée, par des limites non infligées à l'industrie du charbon.

Aucune technologie n'est à l'abri d'accidents. Récemment, des débordements et des ruptures de barrages en Italie et en Inde ont causé chacun plusieurs milliers de morts. Les accidents survenant dans les mines de charbon, les incendies de centrales à charbon et à gaz et les explosions de gazoducs tuent généralement des centaines de personnes par accident. La catastrophe de l'usine chimique de Bhopal, en 1984, a entraîné 3000 décès immédiats et intoxiqué plusieurs centaines de milliers de personnes. D'après l'Agence pour la protection de l'environnement des États-Unis, il s'est produit aux États-Unis, entre 1987 et 1996, plus de 600 000 rejets accidentels de produits chimiques toxiques qui ont tué au total 2565 personnes et en ont blessé 22 949.

En comparaison, les accidents nucléaires ont été rares et bénins. L'accident récent survenu au Japon, dont on a beaucoup parlé, n'a pas eu lieu dans une centrale nucléaire mais dans une installation de traitement du combustible destiné à un réacteur de recherche. Il n'a causé, dans le public, ni décès ni blessure. Quant à l'explo-

sion de Tchernobyl, elle a résulté d'une erreur humaine liée à l'exploitation d'un modèle de réacteur fondamentalement défectueux qui n'aurait jamais reçu d'autorisation à l'Ouest. Il a causé d'importants dommages humains et écologiques à l'échelon local, y compris 31 décès, la plupart par irradiation. L'incidence des cancers de la thyroïde, qui auraient pu être prévenus par une rapide prophylaxie à l'iode, a augmenté chez les enfants ukrainiens exposés aux retombées. Plus de 800 cas ont été diagnostiqués et l'on en prévoit plusieurs milliers d'autres; bien que la maladie soit curable, trois enfants sont décédés. Les calculs fondés sur le modèle NSL laissent prévoir 3420 décès par cancer chez les habitants de la région de Tchernobyl et chez les nettoyeurs. Le réacteur de Tchernobyl ne disposait d'aucune structure de confinement, système fondamental de sûreté qui est exigé sur les réacteurs occidentaux. Les calculs réalisés après l'accident montrent qu'une telle structure aurait confiné l'explosion et, partant, la radioactivité, ce qui aurait évité toute blessure ou tout décès.

Ces chiffres, s'agissant du pire accident nucléaire jamais survenu, sont remarquablement faibles comparés aux plus graves accidents survenus dans d'autres industries. Plus de 40 ans d'exploitation commerciale de l'énergie nucléaire ont montré que cette dernière est bien plus sûre que les systèmes à combustibles fossiles pour ce qui est des accidents industriels, des dommages causés à l'environnement, des effets sur la santé et des risques à long terme.

## RÉÉVALUER LE RECYCLAGE

La plupart de l'uranium utilisé dans les réacteurs nucléaires est inerte. C'est un produit non fissile inutilisable à des fins d'armement. Les réacteurs en exploitation, cependant, produisent du pluto-

nium fissile susceptible d'être utilisé dans des bombes. C'est pour quoi la commercialisation de l'énergie nucléaire suscite des craintes de prolifération des armements. En 1977, le président Carter a reporté indéfiniment le recyclage du combustible nucléaire "irradié", évoquant des risques de prolifération. Cette décision a effectivement mis fin au recyclage nucléaire aux États-Unis, alors que ce recyclage réduit le volume et la radiotoxicité des déchets nucléaires et pourrait porter les réserves de combustible nucléaire à plusieurs milliers d'années. D'autres pays ont évalué les risques différemment et la majorité d'entre eux n'ont pas suivi l'exemple américain. La France et le Royaume-Uni recyclent actuellement le combustible irradié; la Russie stocke le combustible et le plutonium séparé pour démarrer de futurs réacteurs rapides; le Japon a commencé à utiliser l'uranium recyclé et le combustible à oxydes mixtes (MOX) dans ses réacteurs et a récemment approuvé la construction d'une nouvelle centrale nucléaire devant utiliser 100% de MOX d'ici à 2007.

Bien que le plutonium provenant des réacteurs puisse théoriquement être utilisé pour fabriquer des explosifs nucléaires, le combustible nucléaire est réfractaire, hautement radioactif et impossible, pour des terroristes, à transformer. Les armes fabriquées à partir de plutonium provenant de centrales seraient fortement radioactives, instables et de rendement incertain. L'Inde a extrait du plutonium de qualité armement d'un réacteur à eau ordinaire canadien et interdit l'inspection de certains réacteurs polyvalents qu'elle a construits. Toutefois, aucun plutonium n'a jamais été détourné d'installations de recyclage britanniques ou françaises et aucun combustible détourné à des fins d'armement; les inspections de l'AIEA préviennent efficacement

de tels détournements. Le risque de prolifération, selon l'AIEA, "n'est pas nul et ne deviendrait pas nul même si l'énergie nucléaire cessait d'exister. Ce n'est qu'en renforçant continuellement le régime de non-prolifération qu'on pourra prévenir la prolifération des armes nucléaires".

L'ironie, c'est qu'en enfouissant le combustible irradié sans extraire son plutonium par recyclage, on augmenterait en fait le risque à long terme de prolifération nucléaire, car la décroissance, en un à trois siècles, d'isotopes moins fissiles et plus radioactifs dans le combustible irradié améliore les qualités explosives du plutonium qu'il contient, le rendant plus intéressant pour la production d'armes. Outre qu'il étendrait presque indéfiniment les ressources mondiales en uranium, le recyclage permettrait de convertir le plutonium en énergie utile tout en le décomposant en déchets nucléaires de plus courte période, non fissiles et inoffensifs.

Des centaines de tonnes de plutonium de qualité armement, qui coûtent aux superpuissances nucléaires des milliards de dollars à produire, se sont transformés, au cours de la décennie écoulée, en surplus militaires. Plutôt que d'enfourer – comme l'a proposé Washington – une partie de ce matériau stratégiquement inquiétant mais précieux sur le plan énergétique, mieux vaudrait le recycler en combustible nucléaire. Un système international chargé de recycler et de gérer ce combustible empêcherait toute prolifération clandestine. Comme l'imaginent Edward Arthur, Paul Cunningham et Richard Wagner du Laboratoire national de Los Alamos, un tel système combinerait un stockage accessible sous surveillance internationale, la transformation de tout le plutonium séparé en MOX destiné aux réacteurs de puissance et, à plus long terme, des réacteurs intégrés

modernes de transformation des matériaux qui recevraient, contrôleraient et transformeraient tout le combustible rejeté par les réacteurs de la planète, produisant ainsi de l'électricité et réduisant le combustible irradié en déchets nucléaires de courte période prêts pour un stockage permanent dans les formations géologiques.

## L'ÉTAPE SUIVANTE

Une nouvelle génération de petites centrales électriques modulaires – compétitives par rapport au gaz naturel et conçues pour être sûres, anti-proliférantes et faciles à exploiter – sera nécessaire pour étendre les avantages de l'énergie nucléaire à des pays en développement plus petits qui ne disposent pas d'infrastructure nucléaire. Le Département de l'énergie a financé trois modèles de centrale de ce type, dites de "quatrième génération". Une compagnie sud-africaine, Eskom, a annoncé son intention de commercialiser un réacteur modulaire à lit de boulets refroidi au gaz qui ne nécessite aucun circuit de refroidissement d'urgence du cœur et ne peut, physiquement, "fondre". Eskom estime que ce réacteur produira de l'électricité pour un coût de 1,5 cent par kWh, ce qui est inférieur au coût de l'électricité produite par une centrale à gaz à cycle combiné. Le Massachusetts Institute of Technology et l'Idaho National Engineering and Environmental Laboratory mettent actuellement au point un modèle analogue destiné à fournir de hautes températures utilisées dans des procédés industriels tels que la production d'hydrogène et le dessalement.

Le pétrole est aujourd'hui utilisé principalement pour les transports, mais le moteur à combustion interne a atteint ses limites de perfectionnement. Toute poursuite de la réduction de la pollution due aux transports



passera obligatoirement par l'abandon du pétrole et par la mise au point, pour les automobiles et les poids lourds, de systèmes énergétiques non polluants. En rechargeant les batteries de voitures électriques, on ne fait que transférer la pollution de sources mobiles vers des sources centralisées, à moins que la source centralisée d'électricité soit nucléaire. Les piles à combustible, qui sont en voie de commercialisation, peuvent représenter une meilleure solution. Comme elles produisent de l'électricité directement à partir de combustibles gazeux ou liquides, elles peuvent être rechargées en route, un peu comme les moteurs à combustion interne actuels. Lorsqu'elles fonctionnent à l'hydrogène pur, les piles ne produisent, comme déchet, que de l'eau. Comme l'hydrogène peut être produit à partir d'eau en utilisant de la chaleur ou de l'électricité, on peut envisager une infrastructure énergétique très peu polluante qui utiliserait l'hydrogène produit par l'énergie nucléaire pour les transports, l'électricité d'origine nucléaire et la chaleur industrielle pour la plupart des autres applications, et le gaz naturel et les sources d'énergie

renouvelables comme solution de secours.

Un tel engagement en faveur de l'énergie nucléaire pourrait non seulement enrayer, mais également inverser l'accumulation continue de carbone dans l'atmosphère. Entre-temps, des piles à combustible utilisant du gaz naturel pourraient considérablement réduire la pollution de l'air.

## ALIMENTER L'AVENIR

Pour répondre aux besoins croissants de la planète en énergie, le rapport de la Royal Society and Royal Academy préconise "la création d'un organe internationalement chargé de la recherche-développement énergétique, financé par les contributions des pays sur la base de leur PIB ou de leur consommation totale d'énergie". Cet organe serait "un organisme de financement soutenant, ailleurs, la recherche, le développement et la mise en œuvre de projets de démonstration, pas un centre de recherche à proprement parler". Son budget annuel pourrait s'élever à quelque 25 milliards de dollars, "soit environ 1% du budget énergétique mondial". Pour véritablement développer une offre d'énergie rationnelle et responsable, un tel organe devrait se concentrer sur l'option nucléaire, mettre sur pied un système international de stockage et de recyclage du combustible nucléaire, et

offrir des services spécialisés dans l'implantation, le financement et l'homologation de centrales nucléaires modulaires destinées aux pays en développement.

Selon Arnulf Gruebler, Nebojsa Nakicenovic et David Victor, qui étudient la dynamique des techniques énergétiques, "la part de l'énergie fournie par l'électricité croît rapidement dans la plupart des pays et dans le monde". Tout au long de l'histoire, l'humanité a progressivement décarbonisé ses principaux combustibles, abandonnant régulièrement les sources les plus polluantes riches en carbone. Le monde est ainsi passé du charbon (qui compte un atome d'hydrogène par atome de carbone et a dominé de 1880 à 1950) au pétrole (qui compte deux atomes d'hydrogène par atome de carbone, et qui a dominé de 1950 à ce jour). Le gaz naturel (quatre atomes d'hydrogène par atome de carbone) voit sa part de marché croître constamment. La fission nucléaire, cependant, ne produit pas du tout de carbone.

C'est la réalité physique – et non des arguments concernant l'avidité des sociétés, les risques hypothétiques, l'exposition aux rayonnements ou l'évacuation des déchets – qui devrait renseigner les décisions cruciales pour l'avenir de la planète. La diversité et la redondance étant nécessaires à la sûreté et à la sécurité, les sources d'énergie renouvelables devraient conserver, pendant le siècle à venir, une place dans l'offre d'énergie. L'énergie nucléaire, quant à elle, devrait jouer un rôle essentiel. Malgré son bilan exceptionnel, elle a été reléguée par ses opposants dans la même zone d'ombre et de controverse idéologique que l'avortement et l'évolution. Elle mérite mieux. L'énergie nucléaire est écologiquement sûre, pratique et économique. Loin d'être le problème, elle est l'une des meilleures solutions. □

*Photo : La centrale nucléaire de Forsmark (Suède). Crédit : Göran Hansson*