

## Déchets nucléaires : quels scénarios de production ?

*Un débat public a lieu en France sur le problème des déchets nucléaires. Au-delà des questions techniques, les citoyens doivent être éclairés sur l'évolution possible de la production d'énergie et sur l'inventaire de déchets qui en résultera.*

**E**n février 2005, le ministre français de l'Écologie et du développement durable et celui de l'Industrie ont demandé à la Commission nationale du débat public (CNDP) d'organiser un débat sur la gestion des déchets radioactifs dits de « haute activité et moyenne activité à vie longue », qui proviennent pour l'essentiel de l'industrie nucléaire civile. Le gouvernement souhaitait en effet qu'un débat se tienne à l'issue du programme de recherches de 15 ans engagé par la loi du 30 décembre 1991 – la loi Bataille, du nom du député qui en est à l'origine – et avant la discussion, en 2006, d'un nouveau projet de loi sur la question des déchets nucléaires. La loi Bataille fixait trois axes de recherche, portant sur le tri des matières contenues dans les déchets et la réduction sélective de leur nocivité (axe 1, séparation-transmutation), l'enfouissement en profondeur des déchets, réversible ou irréversible (axe 2, stockage géologique), et le conditionnement et la surveillance dans des installations de surface (axe 3, entreposage de longue durée) (voir l'encadré pages 28 et 29).

La CNDP, autorité administrative indépendante, a donné une suite favorable à la demande du gouvernement et a nommé une Commission particulière du débat public (CPDP) sur la gestion des déchets radioactifs, chargée de préparer le débat, de l'organiser et de l'animer. C'est la première fois que cette autorité met en place un débat sur un problème générique (et non sur un projet comme elle a coutume de le faire) et que le sujet concerne un domaine, le nucléaire, où la transparence et le débat démocratique font traditionnellement défaut dans notre pays.

Cette initiative originale a rencontré un accueil positif et différents acteurs ont participé à la préparation de ce débat, en particulier par des contributions au *Dossier du débat* (cf. [www.debatpublic-dechets-radioactifs.org](http://www.debatpublic-dechets-radioactifs.org)). Celui-ci regroupe les analyses des ministères concernés, de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST), des industriels, des acteurs de la recherche, de la Commission nationale d'évaluation (CNE),

et une analyse dite contradictoire produite par trois experts (dont moi-même) n'appartenant à aucun des organismes en charge du sujet et « connus pour leurs analyses critiques sur la question nucléaire ». Le dossier contient également les prises de position d'une série d'acteurs associatifs.

Sur la base de ce dossier à plusieurs voix, la CPDP organise de septembre 2005 à janvier 2006 une quinzaine de débats publics, en divers lieux, sur les différentes questions ainsi mises en relief (les minutes de ces débats sont également mises en ligne). La Commission rédigera à la suite de cela un rapport de synthèse qui sera remis au gouvernement, et organisera un séminaire de restitution aux députés et sénateurs intéressés.

Sans même attendre ce rapport, la préparation du débat et les réunions publiques déjà tenues apportent des enseignements intéressants. Ils concernent aussi bien les aspects scientifiques et techniques que les problèmes de gouvernance, les problèmes économiques et politiques, les problèmes d'accès à l'information, etc. Le présent article aborde l'évolution prévisible du stock des déchets nucléaires en fonction des différentes stratégies énergétiques que la France pourrait adopter dans les décennies à venir. Il ne s'agit bien sûr que d'un aspect de la question des déchets nucléaires, mais il est primordial pour acquérir une vue quelque peu globale sur ce problème difficile et objet de controverses.

### Combien d'énergie produire et de quelle façon

Comme certains d'entre nous l'avaient proposé, la CPDP avait mis en place un groupe de travail, composé d'experts d'opinions divergentes et chargé d'établir des scénarios prospectifs de l'évolution des stocks de matières nucléaires dangereuses et de déchets nucléaires. Ces scénarios dépendent des hypothèses faites sur l'évolution de la production d'électricité nucléaire et sur l'état de la technologie électronucléaire.

Il existe en France une panoplie assez complète de scénarios de prospective énergétique à l'horizon 2050, panoplie

qui décrit les diverses stratégies en fonction d'objectifs et de contraintes déterminées (par exemple, réduire d'un facteur quatre les émissions de gaz à effet de serre). Le groupe de travail a envisagé diverses valeurs de la production globale d'électricité, allant de 300 à 900 térawattheures en 2050, la part représentée par l'électricité centralisée étant une autre variable. Selon les hypothèses retenues, les recours aux énergies d'origines fossile (gaz, pétrole), renouvelable (solaire, éolienne, etc.) et nucléaire sont différents, ce qui se traduit diversement sur les émissions de gaz à effet de serre et sur la production de déchets nucléaires.

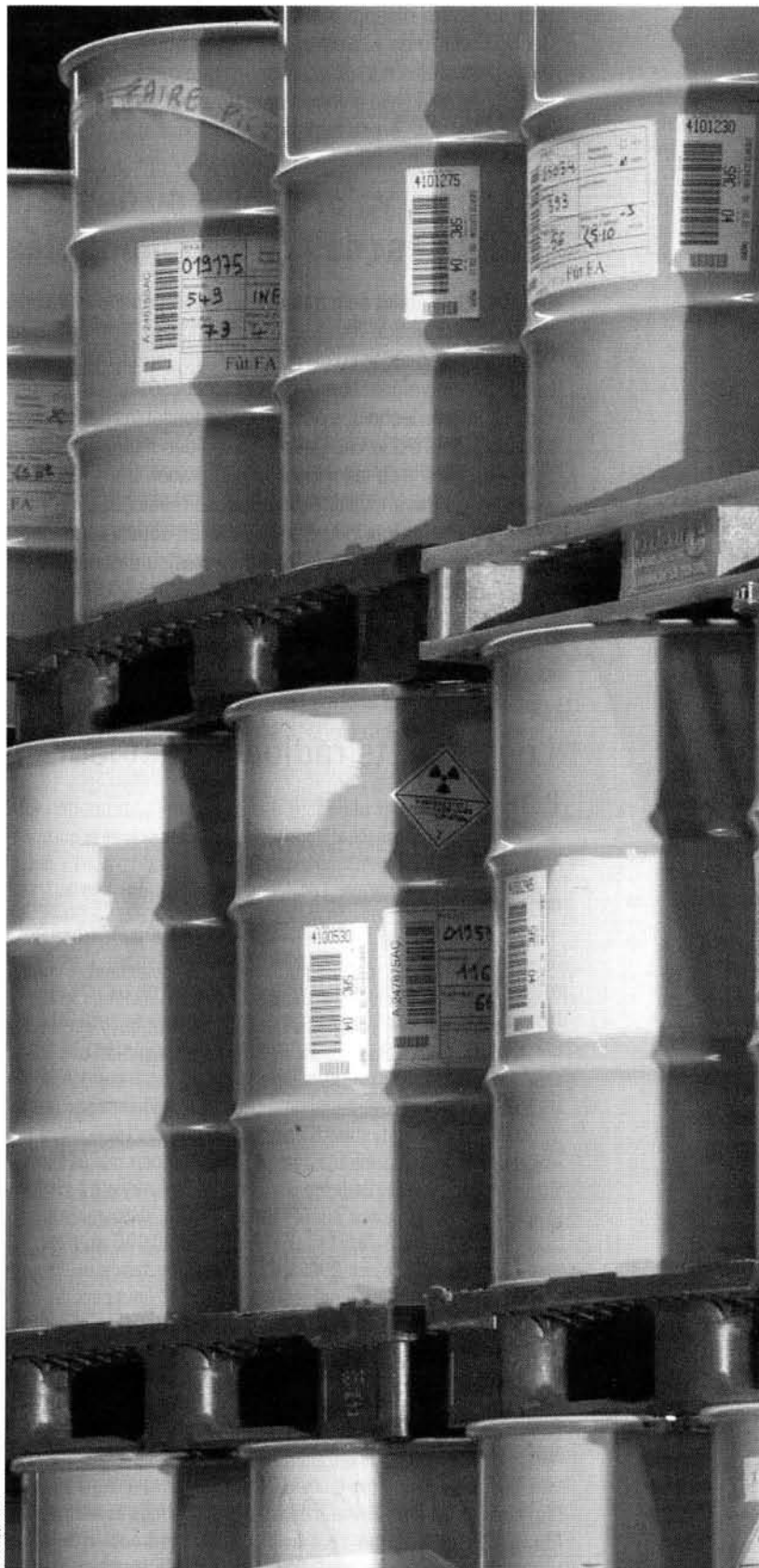
On peut souligner deux scénarios extrêmes. Dans le scénario le plus économe, avec une production de 300 térawattheures en 2050, le besoin en électricité nucléaire serait compris entre 200 térawattheures et zéro (voir la figure 2). Dans le scénario le plus consommateur – une production de 900 térawattheures en 2050 –, la part d'électricité nucléaire augmenterait jusqu'à environ 600 térawattheures, les 300 restants étant d'origine renouvelable ou fossile.

Pour évaluer leurs conséquences sur le stock de déchets nucléaires, on doit compléter ces scénarios de production d'électricité par des hypothèses sur les techniques électronucléaires mises en œuvre entre 2000 et 2150. Selon une première hypothèse, on continuera jusqu'en 2100 à utiliser des réacteurs électronucléaires refroidis à l'eau. Ces réacteurs utilisent comme combustible nucléaire de l'oxyde d'uranium ( $UO_2$ ) ou du MOX, un mélange d'oxydes d'uranium et de plutonium; ils fonctionnent à des températures modestes (300 °C), avec des neutrons lents (les neutrons libérés par les réactions de fission sont ralentis par l'eau) et ont des rendements énergétiques limités (de 33 à 36 pour cent). Le parc de ces réacteurs, de loin les plus répandus, arrivera en fin de vie avant 2050, mais la version améliorée est déjà prête, comme en témoigne le projet EPR (*European pressurised water reactor*).

D'autres hypothèses envisagent l'introduction de réacteurs fonctionnant à plus haute température (de l'ordre de 1 000 °C) et bénéficiant d'un meilleur rendement (jusqu'à 50 pour cent), tels que le HTR (*high temperature reactor*) actuellement à l'étude. Ces réacteurs sont développés notamment en vue d'incinérer le plutonium militaire ou de produire de l'hydrogène. Leur combustible ne sera pas retraitable. Prévus pour être opérationnels vers 2020, ces réacteurs peuvent consommer du plutonium, produisent peu d'actinides mineurs (noyaux lourds à vie longue, tels que le neptunium, l'américium ou le curium, formés par captures successives de neutrons) et, de par leur rendement supérieur, engendrent moins de produits de fission (noyaux radioactifs créés par les réactions de fission nucléaire).

Autre possibilité : des réacteurs à neutrons rapides refroidis par un fluide gazeux, du sodium, du plomb ou des sels fondus. Ces réacteurs encore à l'étude seraient disponibles vers 2040 ou 2050, et leur combustible serait retraitable. Les performances visées devraient idéalement permettre de consommer non seulement le plutonium, mais aussi des actinides mineurs, avec un volume réduit de produits de fission.

Avant de commenter les différents résultats des scénarios présentés, il est indispensable de prendre conscience



P. Stroppa/CEA

1. Des fûts de déchets faiblement radioactifs entreposés dans un hall du CEA, à Saclay, avant d'être conditionnés et stockés.

d'un point majeur, de sémantique, que les différents débats ont parfaitement mis en évidence. La communauté du secteur nucléaire distingue les matières « valorisables » des déchets « ultimes », c'est-à-dire qui ne peuvent être exploités ou recyclés. Or il est vite apparu que cette distinction est largement artificielle et inopérante pour apprécier les risques associés aux différentes stratégies proposées.

## Matières valorisables ou déchets ultimes : des termes inadaptés

D'une part, le statut de matière valorisable dépend de la politique de production retenue. Par exemple, si l'on arrête de produire de l'électricité d'origine nucléaire, toutes les matières aujourd'hui « valorisables » deviennent des déchets. D'autre part, le progrès technique peut rendre valorisables des déchets dits ultimes : c'est le cas pour les actinides mineurs, qui font l'objet de l'axe 1 de la loi Bataille (séparation-transmutation). Enfin, le délai avant valorisation peut se révéler très long : les risques inhérents aux matières valorisables, souvent supérieurs à ceux des déchets ultimes, couvrent plusieurs générations.

En ne discutant que des déchets ultimes, on évite de parler des risques à court, moyen et long termes, associés à la gestion de l'aval du cycle électronucléaire et aux stocks « temporaires » de matériaux dangereux (risques liés au plu-

tonium, au MOX irradié, aux transports, aux rejets d'usines, etc.). Pour apprécier la viabilité des solutions préconisées, il faut évidemment analyser non seulement les risques à très long terme, mais aussi les risques à long terme : ceux qu'il faudra assumer dans les 100 ou 150 prochaines années et qui sont surtout liés aux matières qualifiées de valorisables.

Sur quels indicateurs pertinents une telle analyse doit-elle s'appuyer ? On emploie couramment le volume des déchets, qui n'a pas de rapport direct avec leur nocivité, ou leur radiotoxicité, qui ne rend pas compte des conditions potentielles d'exposition. Aussi, ces indicateurs donnent une vision d'ensemble incomplète et déformée. Le plus simple et le plus fidèle à la réalité physique est de considérer les stocks et les flux, en masse et à un instant donné, des principales matières ou catégories de matières dangereuses, et cela pour chaque solution de gestion envisagée.

Les principales matières dangereuses sont d'abord l'uranium et, surtout, le plutonium, résultat de la capture de neutrons par des noyaux d'uranium. Le plutonium, en raison de son utilisation dans les armes nucléaires et de sa très haute radiotoxicité, est central dans les comparaisons. À cela s'ajoutent les actinides mineurs (neptunium, américium et curium, par exemple, engendrés par l'irradiation de l'uranium ou du plutonium) et l'ensemble des produits de fission, en particulier les produits de fission à vie longue. Les produits de fission ne jouent pas un rôle essentiel dans la radiotoxi-

## Les déchets radioactifs et leur gestion

**U**n déchet radioactif désigne toute quantité de matière pour laquelle aucune utilisation n'est prévue et qui contient des éléments radioactifs en concentration non négligeable et exigeant un contrôle. Les déchets sont classés selon leur nature, leur niveau de radioactivité et la durée de vie des isotopes radioactifs qu'ils contiennent.

Les déchets de très faible activité proviennent essentiellement du démantèlement des installations nucléaires, et leur statut définitif (recyclage ou décharge spécifique) est encore à l'étude. Les déchets de faible activité proviennent des installations nucléaires (outils, résines, gants, etc.), des laboratoires de recherche et de l'utilisation de radioéléments par la médecine ou par l'industrie. S'ils sont à vie courte (période radioactive inférieure à 30 ans), ils sont en France stockés dans des sites de surface. Pour les déchets de faible activité à vie longue (période radioactive supérieure à 30 ans), des stockages spécifiques sont à l'étude. Les quelque 800 000 mètres cubes (pour la France, en 2002) de déchets de faible ou moyenne activité à vie courte représentent environ 80 pour cent du volume des déchets radioactifs, mais seulement 0,07 pour cent de la radioactivité totale.

Beaucoup plus problématiques sont les déchets de moyenne et haute activité, surtout s'ils sont à vie longue. Les déchets de moyenne activité à vie longue proviennent surtout des usines de fabrication et de retraitement du combustible nucléaire et des centres de recherche du CEA (Commissariat à l'énergie atomique). Ils représentent 4,6 pour cent du volume total des déchets radioactifs, et 3,9 pour cent en termes de radioactivité. Ils sont entreposés sur les sites de la Hague et de Marcoule dans l'attente d'une solution plus définitive. Quant aux déchets de

haute activité à vie longue, leur volume est faible (un peu plus de 1 600 mètres cubes à la fin de 2002), mais ils constituent 96 pour cent de la radioactivité de tous les déchets. Provenant surtout du combustible usé par les centrales électronucléaires puis retraité, ils sont provisoirement entreposés sur les sites de la Hague et de Marcoule, sous forme vitrifiée et dans des conteneurs en inox.

La loi Bataille du 30 décembre 1991 a défini trois axes de recherche sur la gestion des déchets de haute activité à vie longue : 1) la recherche de solutions permettant la séparation et la transmutation des éléments radioactifs à vie longue présents dans ces déchets ; 2) l'étude des possibilités de stockage réversible ou non dans les formations géologiques profondes, notamment grâce à la réalisation de laboratoires souterrains ; 3) l'étude des procédés de conditionnement et d'entreposage de longue durée en surface. La loi Bataille a également institué une Commission nationale d'évaluation (CNE) chargée de dresser un rapport annuel sur l'avancement des recherches, puis, à l'issue d'une période ne pouvant dépasser 15 ans (c'est-à-dire en 2006 au plus tard), d'établir un rapport global.

Le rapport 2005 de la CNE est disponible. Avant d'évoquer ses principales conclusions, rappelons ce que sont la séparation et la transmutation. Le combustible usé qui sort des centrales nucléaires actuelles contient environ 95 pour cent d'uranium fertile, 1 pour cent de plutonium, 4 pour cent de produits de fission divers, et 0,1 pour cent d'actinides mineurs. En France, le combustible usé est retraité (par le procédé PUREX, qui fait appel à une dissolution des solides dans de l'acide nitrique concentré et bouillant) afin d'en extraire l'uranium et le plutonium et de recycler ces éléments dans du combustible neuf.

citée à long terme, mais ils déterminent le dégagement de chaleur par les déchets.

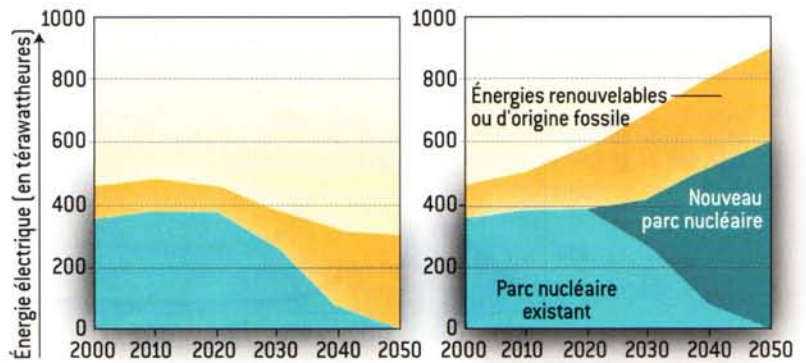
Le groupe de travail a ainsi déterminé l'évolution prévisible des stocks des matières les plus dangereuses – plutonium et actinides mineurs d'une part, produits de fission d'autre part – dans les principaux scénarios envisagés, de 1990 à 2140. Les résultats varient beaucoup en fonction des stratégies adoptées (voir la figure 3). Une première constatation évidente est que, comparées aux stratégies de poursuite du nucléaire à long terme, toutes les stratégies d'arrêt à plus ou moins court terme de la production électronucléaire se traduisent par des bilans annuels et des stocks définitifs de matières nucléaires dangereuses beaucoup plus réduits – et ce quelles que soient les techniques imaginées.

Les courbes d'évolution permettent aussi de remettre en question des affirmations souvent brandies par les acteurs du secteur nucléaire. En voici deux exemples. Le premier concerne les vertus du retraitement des déchets. On entend souvent dire qu'en retraitant, on divise par dix la masse de déchets ultimes (les actinides mineurs et les produits de fission), puisqu'on recycle le plutonium sous forme de MOX. En fait, quand on examine les courbes sur la période 2000-2045 avec et sans retraitement de l'ensemble des matières dangereuses, on constate très peu de différences : la variation est d'au plus 20 pour cent en 2050 sur la masse de plutonium et d'actinides mineurs, tandis que les masses de produits de fission ne pré-

Les recherches sur la séparation visent à extraire les actinides mineurs du combustible usé, de façon que les déchets vitrifiés ne contiennent plus que les produits de fission, dont l'activité devient suffisamment faible en moins de 300 ans (contre une dizaine de milliers d'années pour les déchets vitrifiés actuels). La recherche sur la transmutation vise à transformer les isotopes radioactifs extraits en éléments stables ou de période radioactive plus courte. Cette transmutation se ferait par irradiation au sein d'un réacteur nucléaire à neutrons rapides, ou à l'aide de systèmes pilotés par un accélérateur de particules.

Les recherches sur les trois axes définis par la loi Bataille ont progressé, mais restent inachevées. Ainsi, pour l'axe 1, selon le rapport de la CNE, « le CEA a fait des avancées scientifiques majeures dans la séparation chimique des actinides mineurs [...] ». En revanche, pour la transmutation, on ne dispose pas à ce jour d'un système dont la faisabilité technique [...] est démontrée. Tant pour la séparation que pour la transmutation, un long chemin reste à parcourir. »

Le stockage des déchets dans des formations géologiques profondes, à plusieurs centaines de mètres sous terre (axe 2), est étudié dans le laboratoire souterrain de Bure, dans la Meuse. Aux yeux de la CNE, l'avancement de ces recherches est suffisant pour que le législateur puisse « porter un jugement fondé quant à la poursuite de travaux de grande ampleur ». Cela étant, la CNE estime que si la décision de poursuivre est prise, le projet de stockage devra être mené par étapes d'une « durée de trois à cinq ans » chacune. Quant au conditionnement des déchets et à l'entreposage de longue durée (axe 3), la CNE considère que les recherches ne sont pas achevées, sauf pour l'entreposage industriel des déchets actuels de retraitement.



**2. Divers scénarios d'évolution** de la production d'électricité existant. Ces graphiques présentent les deux scénarios extrêmes pour la période allant de 2000 à 2050, en ce qui concerne le nucléaire. Dans le scénario le plus économique, à 300 térawattheures d'électricité, le renouvellement du parc nucléaire n'est plus indispensable (à gauche).

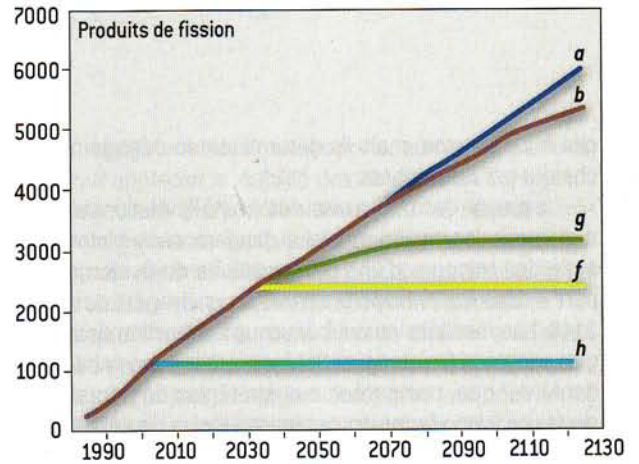
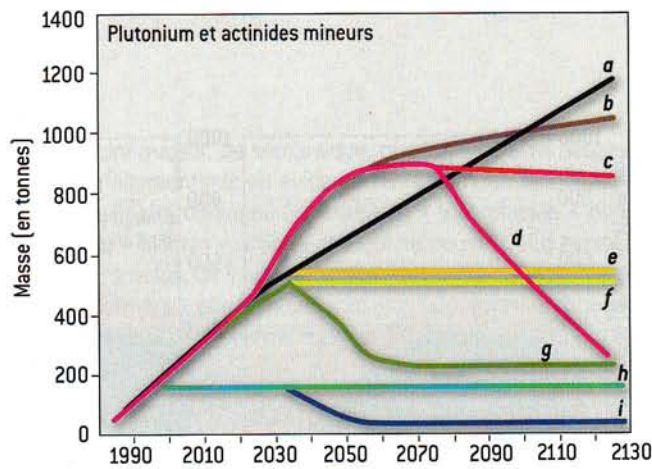
sentent aucune différence. En revanche, le retraitement crée de nouveaux risques notables (liés aux rejets de l'usine de retraitement de la Hague, aux transports de plutonium, etc.).

Une autre affirmation douteuse consiste à dire : « De toutes façons, le parc actuel a déjà produit une quantité non négligeable de différents déchets. Et, sauf à interrompre brutalement la production des centrales avant leur fin de vie, une quantité supplémentaire s'y ajoutera d'ici 2040 ou 2050, date d'extinction naturelle du parc actuel. » En d'autres termes, « le coup est déjà parti » et nous serions condamnés à gérer des quantités importantes de déchets radioactifs.

## Des paris et des exigences implicites

Certes, l'industrie électronucléaire produit depuis son origine des matières nucléaires dangereuses et des déchets. Aujourd'hui, la masse de plutonium non utilisé et d'actinides mineurs est de l'ordre de 200 tonnes en France, et elle sera de l'ordre de 500 tonnes à la fin de vie du parc actuel. En poursuivant avec le même type de technologie, on en sera à 1500 ou 2000 tonnes en 2100 selon le niveau de production électrique atteint (même chose pour les produits de fission, qui sont en quantité proportionnelle à la production cumulée d'électricité). En 1990, on ne dépassait guère 50 tonnes des mêmes produits dangereux. D'où la question : quand le coup est-il parti ? Est-ce indifférent d'avoir à gérer 10, 100 ou 2000 tonnes de matières très dangereuses sur un temps actuellement indéterminé, mais qui se compte en plusieurs décennies ?

L'analyse des résultats met aussi en évidence les exigences implicites et les différents paris qu'impliquent les techniques les plus ambitieuses, souvent proposées comme la panacée. Le cas de la séparation-transmutation en est un bon exemple. En effet, son succès éventuel suppose que le nucléaire restera dominant pendant au moins 130 ans (voir la figure 3). Il faut d'abord attendre au moins 2040 pour disposer des réacteurs et des usines de séparation-fabrication nécessaires. La solution de la séparation-transmutation est donc sans intérêt pour les matières dangereuses issues du parc actuel, lequel disparaîtra avant cette échéance. Au-delà, en cas de succès technique, la masse de plutonium et



**3. L'évolution prévisible** des masses de plutonium et d'actinides mineurs d'une part, des produits de fission d'autre part, dans différents scénarios, où la production électronucléaire se poursuit (a à d) ou non (e à i). On a représenté : la poursuite du nucléaire avec réacteurs EPR (a) ; avec réacteurs EPR et réacteurs à neutrons rapides

(RNR) (b) ; avec RNR et transmutation (c) ; avec RNR, transmutation et incinération du plutonium (d) ; l'arrêt du nucléaire en 2040 et arrêt du retraitement en 2010 (e) ; arrêt en 2040 et poursuite du retraitement (f) ; arrêt du nucléaire en 2040 et incinération du plutonium (g) ; arrêt en 2010 (h) ; arrêt en 2010 et incinération du plutonium (i).

d'actinides mineurs passera par un pic élevé vers 2080 et ne commencera à diminuer que vers 2120 ou 2130.

L'adoption de la séparation-transmutation définie dans la loi Bataille exclut donc toute possibilité de changement de politique énergétique : si l'on s'arrête en route, le remède se révélera pire que le mal. Pour les produits de fission, la situation est encore plus claire, puisque leur masse dépend principalement de la quantité totale d'électricité produite (corrigée cependant du rendement des réacteurs, ce qui avantage les réacteurs HTR).

## Un pari... pour revenir dans un siècle à la situation d'aujourd'hui

On est donc confronté à un pari portant sur trois ou quatre décennies de recherche et développement, qui consiste à mettre au point la chaîne nécessaire à la séparation, au recyclage, à la surgénération et à la transmutation des actinides mineurs et des produits de fission. À l'évidence, ce pari n'est pas facile à gagner et comporte un risque de nature scientifique et technique. L'étape de démonstration industrielle franchie, si elle l'est, il faudra mettre en place un complexe industriel complet. Comme l'a expliqué l'académicien Robert Dautray, outre un nouveau parc de réacteurs à neutrons rapides, il faudra notamment des usines de fabrication de nouveaux combustibles pour les réacteurs à neutrons rapides, des usines d'extraction mécanique et chimique de plutonium et de ses descendants radioactifs, des outils de manutention robotisés pour la matière hautement radioactive, afin notamment de se protéger des émissions de neutrons, des moyens pour assurer les transports entre les usines (à moins qu'elles ne soient regroupées en un seul lieu), des moyens pour assurer la sécurité, etc.

Étant donné les inconnues sur la faisabilité industrielle de l'opération, on n'a aujourd'hui aucune idée des conséquences économiques d'une telle stratégie. On sait en revanche que ce complexe industriel potentiel introduit une série de nouveaux risques pour les 100 ou 150 ans qui viennent, risques liés à la sûreté des éléments du complexe, aux rejets des usines, aux transports, etc.

La perspective d'une diminution à très long terme de l'inventaire des déchets est ainsi contrebalancée par la certitude de risques nettement accrus pour les quatre ou cinq

prochaines générations. Et en cas de revirement de politique énergétique, on cumulera les risques du court terme tout en perdant tous les avantages imaginés pour le long terme.

Voilà sur quelques exemples ce que mettent en lumière les scénarios du long terme. En autorisant une analyse exhaustive des risques encourus, ils nous montrent la nature et l'ampleur des paris qui s'attachent à la question des déchets nucléaires, bien en amont des décisions concernant leur stockage souterrain définitif ou leur entreposage éventuel. Plus encore que techniques, ces paris sont de nature politique et sociale.

Si tout va bien, si aucune faille – ni scientifique, ni technique, ni économique, ni politique – ne vient gripper la mécanique imaginée, si aucun retard n'est à déplorer, si l'assentiment de la société est acquis pour toute la période, alors, dans 100 ou 120 ans, nous pourrions revenir, après une période « transitoire » semée de dangers importants, à une situation analogue à celle que nous laisserait le parc électronucléaire d'aujourd'hui, si on le laissait vivre jusqu'à sa fin naturelle.

Tel est le pari qui est, de fait, proposé aux citoyens français. On peut rendre grâce à la Commission du débat public qui a permis d'élargir la problématique, de dépasser le terrain purement technique (sur le choix d'un stockage réversible ou non des déchets) et de mettre en évidence la modestie et l'insuffisance des réponses actuellement proposées au problème des déchets nucléaires.

**Benjamin DESSUS**, ingénieur et économiste, est président de l'Association *Global Chance*.

Ch. BATAILLE et C. BIRRAUX, *Pour s'inscrire dans la durée : une loi en 2006 sur la gestion durable des déchets radioactifs*, rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 2005.

*Petit mémento des déchets nucléaires*, Global Chance, 2005 ([www.agora21.org/global-chance/memento-dechets-nucleaires.pdf](http://www.agora21.org/global-chance/memento-dechets-nucleaires.pdf)).

R. DAUTRAY, *Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil*, rapport à l'Académie des sciences, Tec & Doc Lavoisier, 2005.

P. BONCHE (sous la dir. de), *Le nucléaire expliqué par des physiciens*, EDP-Sciences, 2002.

J.M. CHARPIN, B. DESSUS et R. PELLAT, *Étude économique prospective de la filière électrique nucléaire*, rapport au Premier ministre, La Documentation française, 2000.

<http://www.debatpublic-dechets-radioactifs.org/>