

DEBAT PUBLIC SUR LES DECHETS RADIOACTIFS

CNDP
Commission Particulière

CONTRIBUTION AU DEBAT PUBLIC

Ministères

OPECST

Industriels

Acteurs
de la recherche

CNE

Analyse
contradictoire

Gestion des déchets nucléaires à vie longue

Analyse contradictoire

Benjamin DESSUS, Bernard LAPONCHE,

Yves MARIGNAC, auteurs désignés par la CPDP, experts des questions énergétiques et nucléaires, connus pour leurs analyses critiques sur la question nucléaire.

La tenue d'un débat public ouvert sur la gestion des déchets nucléaires suppose que les questions et les préoccupations du public, complètement explicitées, soient mises au centre du débat, et que la diversité des stratégies de réponses possibles soit mise sur la table sans tabou.

Ces conditions ne sont pas remplies en France aujourd'hui : le débat, malgré les incertitudes et les questions en suspens, reste prisonnier d'une grille de lecture fermée des enjeux et de leurs solutions (**section 1**). On réexamine ici ces questions en élargissant le cadre, à partir d'une grille d'analyse croisant un tableau des matières en jeu, de leur dangerosité et des risques associés (**section 2**). Des scénarios illustrent les marges de manœuvre sur l'inventaire à long terme et les difficultés de gestion correspondantes (**section 3**). Les conditions nécessaires à la mise en place d'une véritable gouvernance (**section 4**) sont examinées.

1. LE CONTEXTE DU DEBAT SUR LES DECHETS NUCLEAIRES

Le débat sur la gestion des déchets nucléaires à vie longue se développe actuellement dans un cadre de réflexion essentiellement technique, totalement investi par les acteurs institutionnels de l'industrie nucléaire et de la recherche, où la société civile peine à ce jour à trouver sa place.

1.1. Des recherches non conclusives

Les recherches technologiques menées sur les trois axes définis par la loi de 1991 n'apportent pas de résultats suffisants pour engager rapidement des décisions de gestion. De plus, l'apport des sciences humaines sur les dimensions sociales ou éthiques a été totalement négligé et la connaissance économique reste très insuffisante.

La loi de 1991 fixait trois axes de recherche, portant respectivement sur le tri des matières contenues dans les déchets et la réduction sélective de leur nocivité, l'enfouissement en profondeur des déchets, réversible ou irréversible, le conditionnement et la surveillance dans des installations de surface. Les avancées obtenues dans ces différentes voies sont de nature inégale. La réflexion a par ailleurs évolué sur leur articulation, depuis leur compétition vers leur complémentarité.

- L'**entreposage de longue durée** est, de très loin, la voie la plus avancée en terme de faisabilité. On estime aujourd'hui que des entreposages à l'échelle d'un siècle, éventuellement renouvelables, sont réalisables et peuvent être opérationnels à court terme. Le peu d'intérêt des industriels du nucléaire pour cette solution, perçue comme un intermédiaire évitable vers les solutions définitives, a cependant entraîné des retards dans les recherches de cet axe, et n'en permet pas la validation définitive.
- Les recherches sur le **stockage géologique** sont restées très en deçà du programme initial. Elles ont en particulier failli sur un point essentiel, scientifique et politique : alors que la loi de 1991 prévoyait "plusieurs laboratoires", théoriquement destinés à tester des milieux géologiques différents (argile et granit), un seul a finalement été implanté, dans l'argile de Bure. Les travaux de creusement du laboratoire ont

eux-mêmes pris du retard, et la recherche mise en œuvre reste donc préliminaire. Si aucun élément rédhitoire n'est apparu à ce stade, de nombreuses recherches restent nécessaires pour qualifier cette solution. En parallèle des expérimentations, très peu a été fait sur l'élaboration de critères d'acceptabilité d'un futur stockage éventuel, ou de critères plus opérationnels comme la définition de son éventuelle réversibilité.

- La **séparation-transmutation** reste hypothétique. Des avancées importantes ont été obtenues sur la séparation, mais on reste loin d'une démonstration de faisabilité industrielle globale pour l'ensemble des matières concernées. Les recherches sur la transmutation ont seulement démontré la faisabilité d'expériences à l'échelle de petites "cibles" correctement placées dans des réacteurs. La faisabilité industrielle suppose le passage de deux sauts qualitatifs dont rien ne permet de préjuger aujourd'hui la réussite : celui d'une cible à un cœur de réacteur, et celui d'un réacteur à un parc optimisé de multiples réacteurs.

Les recherches en sciences humaines, absentes du programme initial de la loi, le sont encore du bilan final alors même que leur contribution est essentielle pour prendre en compte les dimensions sociales ou éthiques du problème. Il en est de même pour la dimension économique : aucun élément de certitude ou presque n'existe aujourd'hui sur les coûts réels attendus des différentes solutions. Les résultats des recherches menées à ce jour restent donc largement insuffisants pour conclure et engager des décisions sur la gestion finale des déchets.

1.2. Des présupposés fortement restrictifs

Les principaux acteurs du processus de décision partagent une même vision de la stratégie à mettre en œuvre qui repose sur deux présupposés majeurs : la poursuite à long terme de l'option nucléaire et le développement de technologies visant à réduire le stock de déchets "ultimes". Les implications à court et long terme de ces options et l'incertitude qui leur est attachée doivent être explicitées.

Les principaux acteurs des décisions à prendre en 2006 proposent des lectures extrêmement convergentes : industriels (EDF, AREVA), “pilotes” de la recherche (CEA, ANDRA), pouvoirs publics et législateur (à travers l’OPECST) semblent partager une vision centrée sur le renforcement des options actuelles et le déploiement progressif d’une industrie de séparation-transmutation. Pour ces acteurs, le débat est sous tendu par deux présupposés implicites majeurs :

- la poursuite à long terme (au moins un siècle) d’une activité soutenue de production d’électricité nucléaire en France ;
- une définition très étroite de la notion de déchet, réduite à celle des “déchets ultimes”, sans qu’à aucun moment la notion de temps ne soit associée à ce terme “ultime” ni que le caractère dangereux de l’ensemble des matières nucléaires qui circulent ou se cumulent avant le stade ultime ne soit pris en compte dans l’appréciation des différentes solutions proposées.

D’où une réduction du débat à un choix de solutions de nature technique qui fait abstraction d’une bonne partie des préoccupations principales

des Français en termes de santé et d’environnement, liées à la ***dynamique temporelle des flux et des stocks des différentes matières nucléaires***.

L’exposé des stratégies techniques possibles doit prendre impérativement en compte l’analyse de ces dynamiques, en tenant compte du caractère hautement incertain et provisoire de la notion de “déchet ultime”, attachée aux conditions techniques et économiques du moment. Cette exigence logique suppose que les solutions techniques proposées pour la gestion des déchets, et qui n’en concernent aujourd’hui qu’une partie, soient confrontées aux risques potentiels induits par l’évolution des flux et des stocks de chacune des matières nucléaires dangereuses susceptibles de s’accumuler dans les décennies qui viennent (au moins sur un siècle), en fonction notamment des stratégies énergétiques et techniques suivies sur la période.

Une attention toute particulière doit alors être apportée au caractère plus ou moins réversible des solutions, à leur robustesse vis-à-vis de différents aléas (de nature physique, technico-économique, politique ou sociale), et aux caractéristiques temporelles des contraintes associées aux différentes stratégies proposées.

2 - LES DÉCHETS ET MATIÈRES NUCLÉAIRES DANGEREUSES : DE QUOI S’AGIT-IL ?

Le débat sur les déchets nucléaires et leur gestion se concentre légitimement sur la recherche de “solutions”. Cette orientation suppose que le ou les “problèmes” à résoudre soient clairement identifiés et fassent l’objet d’un consensus. En réalité, des incertitudes et des controverses existent sur des points aussi fondamentaux que la liste des matériaux concernés ou les priorités en termes de maîtrise des risques. Un préalable au débat sur les options de gestion est donc de s’accorder sur une définition commune du problème. On passe ici en revue les principaux éléments à prendre en compte pour établir la liste des matières et des risques.

2.1. Le tableau des matières

L’inventaire réalisé par l’ANDRA, publié fin 2004, fournit pour la première fois un tableau clair des déchets radioactifs et, dans une certaine mesure,

des stocks de matières nucléaires accumulés sur le territoire national. Les matières concernées par le débat public (dites de moyenne activité à vie longue ou de haute activité) forment un ensemble extrêmement divers dans leurs caractéristiques et les problèmes qu’elles posent.

2.1.1. Un tableau compliqué par le choix du retraitement

Le choix du retraitement du combustible irradié, par opposition à son stockage direct, structure le tableau des déchets et matières à prendre en compte en multipliant le nombre de catégories à gérer : en séparant les matières du combustible irradié, on génère des déchets spécifiques, l’entreposage de matières “valorisables” et la gestion de nouveaux types de combustibles qui réutilisent ces matières.

Au-delà du choix d’exploiter ou non un parc nucléaire, il existe deux grandes options de gestion

des combustibles nucléaires usés qu'il produit. La première considère ce combustible irradié comme un déchet et vise à le stocker en l'état : on parle de "stockage direct". La seconde, mise en œuvre par la France, vise au contraire à séparer les matières contenues dans ce combustible pour en réutiliser une partie, la partie restante seule constituant les déchets ultimes : c'est la voie du "retraitement-recyclage". La France est le pays le plus avancé dans cette voie. La grande majorité du combustible déchargé des réacteurs dans le monde n'est pas retraitée aujourd'hui, de moins en moins d'exploitants de centrales nucléaires ayant recours à cette option. Le choix politique et industriel du retraitement rend plus complexe, en termes qualitatifs, le tableau des matières à gérer :

- dans le **cas du stockage direct**, les déchets de moyenne activité à vie longue (dits de catégorie B) et de haute activité (dits de catégorie C) sont essentiellement de deux types :
 - les déchets B liés à l'exploitation du parc de réacteurs et des installations associées, indépendamment des choix sur le combustible,
 - le combustible uranium usé, ou irradié, considéré directement comme un déchet C. Ce combustible, appelé UOX, contient diverses matières radioactives formées au cours de son irradiation¹.
- dans le **cas du retraitement**, le combustible UOX est traité, et à ces deux catégories s'ajoutent :
 - des déchets B spécifiques au retraitement, principalement les gaines métalliques des crayons combustibles, et les déchets issus des procédés chimiques de traitement,
 - des déchets C également spécifiques au retraitement, les colis de verre enfermant le contenu non valorisable du combustible usé,
 - les produits issus de la réutilisation du plutonium sous forme de MOX², combustible MOX irradié et rebuts de fabrication,
 - le combustible issu de la réutilisation éventuelle de l'uranium de retraitement, combustible URE (uranium ré-enrichi) irradié,
 - et enfin les matières nucléaires "valorisables" séparées (stocks de plutonium et d'uranium de retraitement en attente d'une réutilisation prévue ou "différée").

2.1.2. Matière "valorisable" et déchet "ultime", une frontière floue

La séparation entre matière "valorisable" et déchets "ultimes" dépend des conditions techniques et économiques du moment. C'est ainsi que toute projection sur la "valorisation" des matières issues d'un parc nucléaire aujourd'hui vieillissant implique nécessairement la poursuite du nucléaire.

Pour envisager une gestion durable des déchets, il faut prendre en compte dans le débat, en plus des déchets reconnus comme tels, les matières classées aujourd'hui comme "valorisables" mais dangereuses en attendant cette valorisation éventuelle. Cette approche globale est d'autant plus nécessaire que la frontière n'est pas figée : le contenu énergétique du plutonium, et dans une bien moindre mesure de l'uranium, présents dans une partie des produits considérés (en particulier les combustibles irradiés) est incontestable, mais cela ne suffit pas en soi à les rendre systématiquement "valorisables". La définition générale des déchets ultimes et matières valorisables fait appel à une notion de "conditions techniques et économiques du moment" qui s'applique mal aux délais très longs de gestion des matières nucléaires. Pour le long terme, la distinction est donc d'abord politique : ainsi les combustibles du réacteur à neutrons rapides Superphénix sont entreposés sur le site en vue d'un retraitement prévu au plus tôt en 2035 – un objectif théorique qui permet en fait de repousser la décision sur leur véritable statut. Dans la situation actuelle, le parti-pris de récupération des matières valorisables, qui conduit à poursuivre le retraitement et l'accumulation de plutonium, n'est cohérent que dans une hypothèse implicite de renouvellement du parc nucléaire : le parc actuel, ne permettra pas en effet de "recycler" les quantités de matières projetées comme le montre le tableau 1. Les projections à 2020 réalisées par l'ANDRA sur la base d'une poursuite du rythme actuel, montrent en effet une augmentation globale des stocks dits "valorisables" qui progressent ou se stabilisent par catégorie. Dans le même temps, une estimation des capacités du parc à "absorber" effectivement ces matières montre un quasi-épuisement de la disponibilité des réacteurs utilisables à cette fin.

¹ Le combustible UOX, (pour oxyde d'uranium) irradié comprend typiquement 1 % de plutonium et 4 % de produits secondaires lorsqu'il est déchargé du réacteur.

² Le combustible MOX (pour « mélange d'oxydes »), comprend 5 % à 10 % de plutonium incorporé dans une matrice d'uranium. Irradié, il contient encore 3 % à 8 % de plutonium, quelques pourcents de produits secondaires, et le reste d'uranium.

Tableau 1 - Point et projection à l'horizon 2020 des principaux stocks "valorisables"

Stock "disponible" ^a	1987	1997	2002	2010	2020
Combustible UOX irradié	3.050 t	9.020 t	10.350 t	11.250 t	10.850 t
Combustible MOX irradié	0 t	195 t	520 t	1.300 t	2.350 t
Combustible URE irradié	0 t	0 t	150 t	350 t	700 t
Uranium de retraitement	~ 7.500 t	~ 12.000 t	16.000 t	20.000 t	25.000 t
Plutonium séparé ^b	2,5 t	38 t	48 t	~ 48 t	~ 48 t
Disponibilité de réacteurs ^c	25 à 35 ans	15 à 25 ans	10 à 20 ans	2 à 12 ans	0 à 2 ans

a. Stocks estimés sur la base d'une poursuite des paramètres d'exploitation actuels (réacteurs et usines du cycle).

b. L'ANDRA indique pour 2010 et 2020 un "stock stable" sans en préciser la valeur.

c. Le calcul présenté ici traduit le nombre d'années d'exploitation moyen restant, à la date concernée, pour les 28 réacteurs 900 MWe (mégawatts électriques) d'EDF techniquement aptes à la "valorisation" (en l'occurrence l'utilisation du MOX) et deux valeurs de durée de vie, celle initialement prévue (30 ans), et de 40 ans, visée aujourd'hui par EDF

Source : d'après Rapport annexe Charpin-Dessus-Pellat, "Parc nucléaire actuel", 2000 ; Inventaire national ANDRA, 2004

2.1.3. Les éléments d'un bilan exhaustif

La définition des solutions de gestion des déchets doit reposer sur un bilan exhaustif des déchets et matières et des problèmes spécifiques qui peuvent leur être associés. Outre les déchets et les matières dites "valorisables" issus du combustible du parc actuel, ce bilan doit prendre en compte l'ensemble des déchets liés au développement des différentes filières et l'ensemble des déchets générés par chaque filière. Les problèmes spécifiques des déchets étrangers et des déchets militaires doivent également être intégrés.

La durée de vie (c'est-à-dire en fait le rythme de décroissance de leur radioactivité) et l'activité (le type et l'intensité de leurs rayonnements) ne sont pas les seuls éléments à prendre en compte pour un tableau complet des déchets. L'ensemble de leurs caractéristiques physico-chimiques, qui déterminent à la fois les conditions techniques de leur gestion et les risques associés, doivent être considérés : plus ou moins grande stabilité physique et chimique, dégagement thermique, criticité, etc.

(voir section 2.2.1.)

L'inventaire des déchets et matières nucléaires réalisé par l'ANDRA, qui les classe en catégories présentant des "caractéristiques homogènes", en dénombre ainsi une centaine (hors matières valorisables), dont trente de déchets B et C.

Il est indispensable de garder à l'esprit l'existence de ces multiples catégories, en considérant que chacune pose des problèmes techniques spécifiques qui peuvent être extrêmement complexes, indépendamment des volumes considérés.

Enfin, au-delà des grandes familles de déchets et matières valorisables présentées ci-dessus,

il ne faut évidemment oublier ni *les déchets issus de la recherche et développement*, ni les *déchets générés par l'ensemble de chaque filière* qui produit des déchets spécifiques, ni les *déchets étrangers* issus des services de retraitement aux électriciens européens et japonais, ni les *déchets militaires*.

2.2. Le tableau des risques

2.2.1. De la dangerosité intrinsèque au risque

Les matières prises en compte présentent une dangerosité intrinsèque variable, fonction de facteurs tels que leur radioactivité, leur toxicité ou leur capacité à entrer dans une réaction nucléaire en chaîne. Cette dangerosité est traduite en risque en la croisant avec des scénarios possibles d'exposition en conditions normales, en conditions accidentelles ou face à des actes de malveillance – risques respectivement traités par les règles d'exploitation, la sûreté et la sécurité.

Différents facteurs entrent en jeu pour déterminer la dangerosité des matières présentes dans l'inventaire. Le premier est celui de leur radioactivité, plus ou moins importante en intensité et en type de rayonnements ; elle définit le risque associé à une présence au contact ou à proximité de ces matières. Le second est la radiotoxicité, qui décrit la nocivité du produit en cas d'irradiation interne (ingestion, inhalation) ou de contact (peau), qui peut s'accompagner d'une toxicité chimique.

Troisième élément : la plus ou moins grande stabilité de ces matières (réactivité chimique, caractère inflammable...). En particulier, leurs propriétés

fissiles (capables de produire une réaction de fission) ou fertiles (capables de produire un élément fissile) distinguent les matières dites “nucléaires” des autres : elles présentent des risques différents sur le plan de la sûreté avec le risque de criticité (réaction nucléaire), et sur le plan de la prolifération

(leur détournement pour la fabrication d’armes atomiques). Le **tableau 2** présente des indications générales, nécessairement simplificatrices, sur l’échelle de dangerosité des grandes catégories de matières selon quelques critères essentiels.

Tableau 2 - Tableau simplifié de la dangerosité intrinsèque des matières concernées

Matières ^a	Radioactivité ^b	Radiotoxicité ^{b,c}	Tox. chimique ^b	Criticité	Détournement ^d
Uranium (U)	●	●	●●	●●●	●●●
Plutonium (Pu)	●●	●●● à ●●●●	●●	●●●●	●●●●
Actinides mineurs (AM)	● à ●●●●	●● à ●●●●	●●	● à ●●	●●
Produits de fission (PF)	● à ●●●●	● à ●●●●	∅ à ●●●	∅	●●

a On distingue ici quatre grandes catégories de matières présentes dans le combustible irradié et les divers produits issus de sa gestion : l’uranium (plusieurs isotopes), le plutonium (plusieurs isotopes), les actinides mineurs et les produits de fission. Pour chacune les indications de dangerosité sont basées sur une moyenne des radionucléides concernés. On distingue cinq niveaux de dangerosité : ∅ nulle, ● faible, ●● modérée, ●●● forte et ●●●● très forte.

b. On compare ici la radioactivité, la radiotoxicité et la toxicité chimique des matières sur des unités de masse équivalentes.

c. On ne tient compte ici que des principaux isotopes en termes de quantités mises en jeu – on néglige par exemple la présence en faibles quantités dans l’uranium de retraitement d’uranium-236, à la forte radiotoxicité.

d. On indique ici quel usage “militaire” pourrait être fait après détournement des matières considérées (sous certaines conditions, notamment selon les formes sous lesquelles elles pourraient être accessibles) : on indique un danger très fort pour les matières utilisables dans une bombe nucléaire, modéré pour les matières utilisables avec un explosif classique dans une bombe “sale”. On ne tient pas compte ici d’exceptions telles que le neptunium (AM), qui peut être utilisé pour fabriquer une bombe nucléaire, ou le deutérium et le tritium (PF), matières indispensables à la fabrication de certaines armes nucléaires.

Pour être traduite en risque, la dangerosité intrinsèque des matières doit être croisée avec des scénarios possibles d’exposition (par irradiation ou contamination), déterminés par les conditions de gestion des déchets et matières valorisables.

On distingue en particulier :

- les **conditions normales** qui induisent des expositions directes à la radioactivité, par proximité avec les colis ou via des rejets de fonctionnement, en principe maintenues à des niveaux sensiblement inférieurs aux limites réglementaires d’exposition des travailleurs et des populations ;
- les **conditions accidentelles** qui peuvent avoir des causes internes (criticité, explosion chimique, échauffement...) et/ou externes (séismes, inondations, accidents de transport...). La sûreté vise à les maîtriser en renforçant les systèmes de protection (barrières de confinement), de contrôle et de sauvegarde pour maintenir la probabilité de fortes expositions en dessous d’un niveau jugé admissible ;
- les **actions malveillantes** qui peuvent viser soit à disperser les matières radioactives concernées (agression terroriste, bombe sale), soit à s’emparer des matières nucléaires (prolifération). La sécurité vise, par conception, à rendre ce type d’action impraticable.

La vulnérabilité (la facilité avec laquelle un scénario d’accident ou de malveillance se produit) et la sensibilité (l’ampleur des conséquences du dit scénario) sont très variables selon le type de matières en jeu et leur conditionnement.

Ainsi, étant donné la très forte radiotoxicité du plutonium par inhalation³, ou son intérêt pour la fabrication d’armes⁴, le plutonium séparé sous forme de poudre d’oxyde ou celui enfermé dans la matrice d’un combustible irradié, chaud et très radioactif, présentent des risques très différents.

2.2.2. Les principes d’une gestion globale des matières et des risques

Les stratégies de gestion des déchets ont des conséquences sur la dangerosité intrinsèque ou sur les risques d’exposition. Plusieurs principes s’appliquent : minimisation des risques, cohérence des solutions, justification des options au regard de l’ensemble des risques aux différentes échelles de temps. En particulier, la réduction de la dangerosité à long terme peut se traduire par une augmentation des risques d’exposition à court terme.

Les stratégies de gestion des déchets peuvent combiner des efforts pour réduire la dangerosité intrinsèque (en jouant sur l’inventaire des matières)

³ Quelques dizaines de micro-grammes de plutonium inhalés suffisent à provoquer un cancer des poumons.

⁴ Le plutonium en jeu dans le retraitement du combustible EDF est dit de qualité « réacteur », par opposition à un plutonium dit de qualité « militaire ». Cela signifie seulement qu’il est moins facile, mais pas du tout impossible, de l’utiliser pour fabriquer une bombe.

et pour réduire les risques d'exposition (en jouant sur les conditions de confinement des matières). Le tableau d'ensemble des risques doit tenir compte du fonctionnement normal, des accidents et des questions de sécurité, à chaque étape de traitement de l'ensemble des déchets et matières valorisables considérés, aux différentes échelles de temps engagées.

À défaut d'établir ce tableau global, quelques principes méritent d'être soulignés.

- **la minimisation des risques** par la mise en œuvre aussi tôt que possible de solutions efficaces de conditionnement et d'entreposage.
- l'optimisation, ou **la cohérence des solutions adoptées**: maîtrise des équilibres de flux pour éviter des stockages et manipulations inutiles (contrairement à ce qu'on observe aujourd'hui, en particulier sur le plutonium⁵), maintien d'une cohérence parfois difficile entre des modifications en amont (évolution des taux de combustion notamment) et leurs conséquences en aval du traitement du combustible.
- **la justification des options au regard de l'ensemble des risques aux différentes échelles de temps**. Par exemple, si le choix industriel du retraitement est vu comme une tentative de réduction de la radiotoxicité intrinsèque des déchets ultimes, sa mise en œuvre modifie profondément le tableau des risques : la réduction de risques potentiels visée à long terme entraîne des risques effectifs consentis à court terme (augmentation des rejets, des manipulations, des transports...).

une vision d'ensemble déformée. D'autre part, les caractéristiques des matières évoluant dans le temps, l'évaluation du bilan des déchets et de sa réduction varie selon l'échelle de temps privilégiée. Le plus simple, et le plus fidèle à la réalité physique, est de considérer les stocks et les flux des principales matières ou catégories de matières pertinentes pour le bilan des déchets B et C pour un type de gestion déterminé :

- les matières nucléaires, **uranium** (U) et surtout **plutonium** (Pu). Ce dernier, par son statut ambivalent de ressource énergétique non conventionnelle ou de matière hautement toxique, est bien sûr central dans les comparaisons ;
- les **actinides mineurs** (AM), tels que neptunium, américium et curium, générés par l'irradiation de l'uranium et du plutonium dans le combustible irradié ;
- l'ensemble **des produits de fission** (PF) générés par la réaction de fission, en particulier les produits de fission à vie longue, qui sont déterminants pour le dégagement thermique. Leur bilan dépend en premier lieu du rendement des réacteurs, et non des choix de combustible.

En plus de ces catégories, il est utile de rendre compte spécifiquement des stocks de combustible irradié, en distinguant le combustible à l'uranium et le combustible mixte uranium-plutonium pour tenir compte de leurs caractéristiques respectives (par exemple, le dégagement thermique beaucoup plus important des combustibles MOX irradiés).

2.3. Le choix d'indicateurs

La définition d'indicateurs quantitatifs permettant la mesure des risques liés aux inventaires dans différentes gestions est difficile. Le plus simple est de s'en tenir à l'évaluation des masses des principales matières ou catégories de matières concernées, uranium, plutonium, actinides mineurs et produits de fission, stocks de combustible irradié (en attente de stockage ou de retraitement).

Bien que couramment employés, des indicateurs comme les volumes de déchets, qui n'ont pas de rapport direct avec leur nocivité, ou comme leur radiotoxicité, qui ne rend pas compte des conditions potentielles d'exposition, donnent

⁵ L'inventaire de plutonium séparé non réutilisé entreposé en France sous diverses formes atteignait fin 2003 un total de 78,6 tonnes (dont 30,5 tonnes de plutonium étranger), pour un "volant" utile de 20 tonnes au maximum.

3. MATIERES NUCLEAIRES DANGEREUSES : COMBIEN DE QUOI DANS LES 100 ANS QUI VIENNENT ?

La stratégie de séparation-recyclage-transmutation privilégiée par les pouvoirs publics affiche un but de réduction des inventaires de déchets ultimes à l'horizon de plus d'un siècle. C'est à cette échelle d'au moins 100 ans qu'il faut donc analyser l'évolution qualitative et quantitative des diverses matières nucléaires dangereuses à gérer.

Deux paramètres principaux interviennent.

Le premier est évidemment l'évolution à partir d'aujourd'hui des quantités d'électricité nucléaire à produire pour satisfaire des besoins d'électricité.

Le second est constitué de l'ensemble des filières technologiques nucléaires envisageables à différents horizons, englobant la production (nouveaux réacteurs), son amont (nouveaux combustibles) et son aval (nouvelles gestions du combustible irradié).

3.1. Des scénarios électriques contrastés

L'avenir de la production nucléaire, dans le cadre d'une évolution globale des besoins électriques, est un élément déterminant pour la gestion des déchets. À partir des nombreuses études de prospective énergétique disponibles pour la France, on peut retenir deux visions contrastées pour l'option nucléaire, conduisant à une sortie en fin de vie du parc actuel ou une poursuite de la progression d'ici 2050.

Les options énergétiques et électriques dans lesquelles s'inscriront les stratégies de gestion des déchets ont non seulement une action directe sur les bilans matières, mais aussi un effet d'entraînement sur les évolutions possibles à très long terme. Il ne s'agit pas ici de trancher entre stratégies énergétiques sur un critère restrictif de gestion des déchets, mais de montrer à l'inverse comment les choix de politique énergétique, qui prennent en compte bien d'autres critères, conditionnent cette gestion.

Deux scénarios encadrant l'évolution des moyens de production d'électricité

Fig. 1 Scénario 300 TWh électricité, sans renouvellement du parc nucléaire

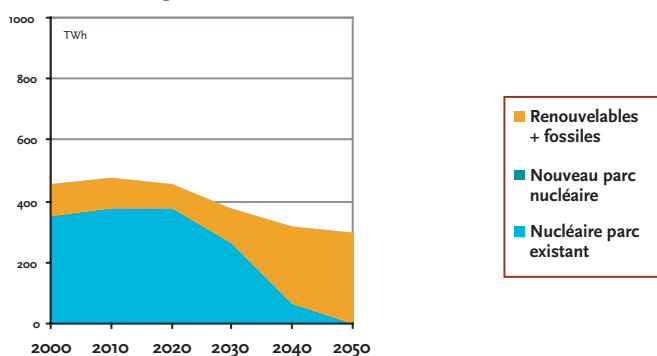
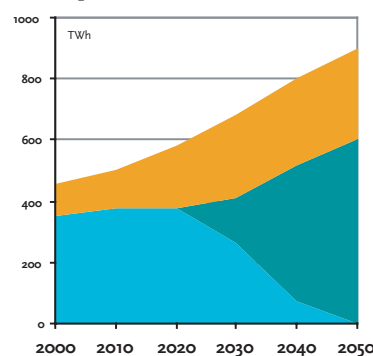


Fig. 2 Scénario 900 TWh électricité, avec renouvellement du parc nucléaire



Il existe en France une panoplie assez complète de scénarios de prospective énergétique à l'horizon 2050 qui décrivent des stratégies diversifiées en fonction d'objectifs et de contraintes déterminées (par exemple réduire d'un facteur 4 les émissions

de gaz à effet de serre). On peut sur cette base retenir des valeurs contrastées de 300 à 900 TWh en 2050⁶, avec des visions différenciées par un niveau global de consommation d'énergie et la part qu'y joue l'électricité centralisée.

⁶ Contre 480 TWh en 2004. On s'appuie ici sur les réflexions menées dans la préparation du débat public sur le projet de réacteur EPR à Flamanville. Voir Enerdata, Eclairages sur la demande électrique en 2050, in Cahier collectif d'acteurs "EPR et choix de société", Commission particulière du débat public EPR « tête de série », juin 2005.

Elles ont bien entendu des conséquences diversifiées sur le recours aux énergies fossiles, renouvelables et nucléaire, donc sur les émissions de gaz à effet de serre et les déchets nucléaires.

On se place dans une hypothèse où l'énergie nucléaire, lorsqu'elle est maintenue, couvre 50 % à 65 % des besoins d'électricité centralisée (une production en base ou semi-base). Les **figures 1** et **2** décrivent sommairement les deux extrêmes dans la fourchette de possibilités pour la production d'électricité de 2000 à 2050 : dans le scénario le plus consommateur, le recours à l'électricité nucléaire pourrait atteindre environ 600 TWh, avec un besoin complémentaire de 300 TWh d'électricité renouvelable ou fossile, dans le scénario à plus bas profil le besoin de nucléaire pourrait évoluer de 200 TWh à zéro.

3.2. Stratégies techniques et matières nucléaires dangereuses

Les options de gestion des déchets sont étroitement liées aux stratégies technologiques mises en œuvre. On a retenu ici une technologie de continuité avec le réacteur EPR et deux technologies de rupture avec les réacteurs haute température (HTR) et les réacteurs à neutrons rapides (RNR).

Le second paramètre d'évolution des flux et stocks de matières nucléaires dangereuses, à évolution donnée de la production nucléaire, est la nature des technologies nucléaires mises en œuvre d'ici la fin du siècle.

Le rapport "Charpin Dessus Pellat" (CDP)⁷, s'appuyant sur une étude d'un groupe de travail CEA-CNRS soulignait en 2000 l'importance de l'évolution des technologies pour à la fois "réduire significativement l'inventaire radiologique des déchets de haute activité et à longue durée de vie, minimiser la production de déchets ultimes ou de combustibles usés et maîtriser les quantités de plutonium dans le cycle du combustible et dans les combustibles usés hors cycle".

Pour notre propos, nous avons retenu ici trois types de filières nucléaires :

- Les filières de réacteurs à eau, comme les réacteurs français actuels. A combustible UOX ou MOX, ils ont en commun des températures modestes, des neutrons lents et des rendements limités (de 33 à 36 %), qui conduisent à la constitution de stocks croissants de plutonium, d'actinides mineurs et de produits de fission dans les combustibles usés. Ces réacteurs sont aujourd'hui massivement déployés, et leur évolution est déjà prête, comme le projet **EPR (European pressurised water reactor)**.
- Les filières à plus haute température qui bénéficient d'un meilleur rendement thermodynamique (jusqu'à 50 %), telles que le **HTR (high temperature reactor)** actuellement à l'étude. Ces réacteurs, plus petits, sont notamment développés pour incinérer le plutonium militaire et/ou produire directement de l'hydrogène. Leur combustible ne vise pas à être retraité. Prévus pour une disponibilité industrielle vers 2020, ils peuvent consommer du plutonium, produisent relativement peu d'actinides mineurs et grâce à leur rendement plus élevé ont une production réduite de produits de fission.
- Enfin, des réacteurs également à haute température, plus éloignés en termes de R&D, regroupés sous les nouvelles filières **RNR (réacteurs à neutrons rapides)**⁸. Ces réacteurs n'existent aujourd'hui que sur le papier, et pourraient être disponibles vers 2040 ou 2050. Leur combustible devra par conception pouvoir être retraité. Les performances visées devraient idéalement permettre de consommer non seulement le plutonium mais aussi des actinides mineurs tout en réduisant la production de produits de fission.

On peut compléter ce rapide panorama (résumé dans le **tableau 3**) par la perspective encore plus lointaine de réacteurs dédiés ou de réacteurs ADS (couplage d'un accélérateur de particules et d'un réacteur) dont la fonction serait essentiellement de réduire le bilan final d'actinides mineurs et, éventuellement de certains produits de fission à vie longue.

⁷ Charpin J.-M., Dessus B., Pellat R., Etude économique prospective de la filière électrique nucléaire française, La documentation française, 2000.

La prospective technologique de la filière nucléaire

⁸ Ces réacteurs se distinguent en particulier de filières à neutrons rapides existantes par l'utilisation d'un fluide de refroidissement gazeux au lieu du sodium liquide (utilisé par exemple par Superphénix).

Tableau 3 - Filières retenues et fonctionnement attendu des réacteurs correspondants

Filières	Disponibilité	Combustible	Plutonium ^a	Actinides mineurs ^a	Produits de fission ^a
EPR (eau pressurisée)	2012-2015 ^b	UOX et MOX ^b	n.d.	+25 kg/TWh	+120 kg/TWh
HTR (haute température)	2020	non retraitable	-110 kg/TWh	+12 kg/TWh	+90 kg/TWh
RNR (neutrons rapides)	2040-2050	retraitable	-60 kg/TWh	-10 à -15 kg/TWh	+80 kg/TWh

a. Le mode de fonctionnement (et le bilan) peut pour chacune des filières varier selon le type de combustible utilisé et les objectifs. Ces variations peuvent être très fortes : les RNR peuvent par exemple être utilisés pour générer du plutonium. On indique ici quel fonctionnement est retenu pour le calcul des bilans de scénarios.

b On retient l'hypothèse d'une reconduction dans un parc EPR du fonctionnement des réacteurs "moxés", (une utilisation de 70 % d'UOX et 30 % de MOX) et une progression des taux de combustion pour atteindre à terme 64 GWj/t pour l'UOX et 55 GWj/t pour le MOX.

Source : d'après Rapport annexe Charpin-Dessus-Pellat, "La prospective technologique de la filière nucléaire", 2000

3.3. Le croisement scénarios énergétiques – stratégies technologiques

3.3.1. Scénarios retenus

Le croisement entre scénarios énergétiques diversifiés et options technologiques également diversifiées fait apparaître les dynamiques d'évolution et les contraintes de gestion

des matières qui en découlent. On a retenu 6 scénarios dont la vocation est d'illustrer la nature des enjeux dans quelques situations caractéristiques.

Tableau 4 - Caractéristiques principales des scénarios

Scénarios		Hypothèses électriques		Hypothèses technologiques	
Production nucléaire	Technologies nucléaires	Evolution du parc	Production nucléaire en 2050	Nouveaux réacteurs ^a	Traitement combustible
1 Poursuite	Continuité	Poursuite du nucléaire	600 TWh	EPR (2020)	Retraitement
2 Poursuite	Rupture			EPR (2020) - RNR (2040)	Séparation transmutation
3 Maintien	Rupture	Maintien	350 TWh	Aucun	Retraitement
4 Sortie	Continuité	Sortie du nucléaire	0 TWh	HTR (2025)	Retraitement
5 Sortie	Rupture			Aucun	Aucun
6 Sortie	Abandon			Aucun	Aucun

a. Nouveaux réacteurs introduits en remplacement ou complément du parc ; entre parenthèse date où commence l'introduction.

Le parc installé en 2050 représente 85 GWe (gigawatts électriques) pour 600 TWh (térawatt-heures), 47 GWe pour 350 TWh, et 12 GWe pour les réacteurs HTR. Par comparaison, le parc de 58 réacteurs exploité par EDF actuellement représente 63 GWe et génère environ 450 TWh.

On a retenu 6 scénarios croisant des choix sur l'option nucléaire et sur les technologies associées⁹ :

- deux scénarios de **poursuite** de l'option nucléaire (renouvellement et accroissement du parc de réacteurs), soit dans une **continuité** technologique [1] soit avec une **rupture** par introduction d'une nouvelle filière RNR [2] ;
- un scénario de **maintien** de l'option nucléaire

(renouvellement partiel avec repli du parc), et la même **rupture** technologique que précédemment [3] ;

- trois scénarios de **sortie** de l'option nucléaire (non renouvellement à la fin de vie du parc actuel¹⁰) se distinguant sur la gestion du combustible : **continuité** de la gestion actuelle [4], introduction d'une **rupture** technologique [5], ou **abandon** de la stratégie de retraitement [6].

9 Cette sélection ne s'appuie pas sur un critère de probabilité d'occurrence ou de représentativité des multiples options envisageables. Les scénarios choisis ont seulement vocation à illustrer les principaux enjeux des décisions à prendre sur la production et les technologies nucléaires, en comparant l'évolution des matières nucléaires dangereuses à gérer pendant un siècle dans quelques situations caractéristiques.

10 On opte ainsi pour une évaluation conservatrice des bilans de scénarios d'arrêt du nucléaire, basés sur la même hypothèse de durée de vie du parc que les scénarios de renouvellement (soit 45 ans par réacteur en moyenne).

3.3.2. Bilans des matières

L'évolution sur longue période (jusqu'en 2010), des indicateurs principaux des différents scénarios est très contrastée. Ces résultats, d'autant plus incertains que les scénarios font appel à de nouvelles technologies, doivent être complétés, pour une évaluation plus fine, par des bilans sur d'autres indicateurs et une analyse qualitative des risques d'exposition.

On propose de suivre les indicateurs principaux définis plus haut depuis 2005 jusqu'à 2110, date à laquelle le nouveau parc d'EPR arriverait en fin de vie (durée de vie 60 ans et dernier réacteur du nouveau parc démarré en 2050).

Les résultats qui suivent appellent deux commentaires préliminaires :

- ils sont par construction *optimistes et très incertains* : les scénarios décrivent en effet le fonctionnement optimal de parcs exploitant des machines idéales telles qu'elles existent sur papier ;
- ils sont par nature *incomplets et insuffisants* : ils ne prennent pas en compte de nombreuses catégories de déchets, (notamment les déchets liés à la R&D, et plus encore les déchets B issus du retraitement) et ne rendent pas compte d'aspects qualitatifs essentiels tels que la forme dans laquelle se trouvent stockées les matières considérées.

(i) L'inventaire plutonium + actinides mineurs (Pu + AM), figure 3

Cet indicateur prend en compte l'ensemble du plutonium et des actinides mineurs (dont les problématiques de gestion sont en grande partie similaires) présents dans les déchets et matériaux valorisables. De grandes divergences existent entre les scénarios, qui multiplient par 2 à plus de 10 l'inventaire actuel.

La stratégie la plus efficace sur ce plan pourrait être d'associer au non renouvellement du parc existant, la mise en route de réacteurs HTR incinérateurs de plutonium [5], qui ferait chuter l'inventaire à une valeur résiduelle de l'ordre de 300 tonnes dès 2080¹¹. Les courbes montrent d'autre part l'énorme inertie du système : en pariant sur la réussite complète du programme de transmutation le plus ambitieux, l'inventaire du scénario 600 TWh [2] tombe certes à une valeur de 400 t, analogue à celle de 2020 vers 2080, mais pour remonter en 2110 à la valeur de l'inventaire laissé par le premier parc en

2050 [4], trois fois supérieur à l'inventaire actuel.

(ii) Les produits de fission (PF), figure 4

Là encore les bilans sont très diversifiés : une multiplication par 2,5 de l'inventaire entre 2005 et 2110 dans le scénario de sortie avec abandon du retraitement [6], le plus favorable, une multiplication par 6,8 dans le scénario de poursuite et de continuité [1].

L'introduction de RNR [2/3] n'est pas du tout suffisante pour maîtriser l'évolution des produits de fission : en 2110, et à condition que les délais proposés soient respectés, la quantité de produits de fission oscillerait entre 5.800 et 4.500 t alors qu'elle n'atteindrait que 2.500 t en 2045 à la fin de vie théorique du parc actuel. La stratégie de mono- recyclage du plutonium couplée au non-renouvellement du parc [5] conduit à une augmentation plus modérée (+ 20 %) des produits de fission.

(iii) L'inventaire des combustibles irradiés MOX, figure 5

Cet indicateur prend en compte la spécificité du combustible MOX irradié, dont le dégagement thermique, très supérieur à celui de l'UOX irradié, est une donnée importante : un refroidissement de 150 ans est en effet nécessaire (contre 50 ans pour l'UOX) avant tout stockage éventuel. La plus mauvaise stratégie est très nettement la poursuite de la stratégie actuelle, avec des EPR utilisant du MOX sans retraitement de celui-ci [1], qui conduit à entreposer jusqu'en 2250 environ de l'ordre de 13.000 t de MOX irradié, contre 2.000 t jusqu'en 2200 pour le scénario de non renouvellement sans incinération ni retraitement [6] et de moins de 200 tonnes pour le scénario avec incinération du plutonium [5]. Les scénarios de recours aux RNR ne sont pas déterminants, avec respectivement 1.000 t [3] et moins de 2.000 t [2] en 2110.

(iv) L'inventaire des combustibles irradiés UOX, figure 6

On considère enfin l'inventaire de combustible UOX irradié laissé en l'état, fonction inverse du degré de poursuite du retraitement. Comme pour le MOX, les résultats sont très contrastés. Le scénario d'arrêt du retraitement provoque bien sûr une augmentation importante du stock d'uranium irradié à gérer avec 40.000 t [6]. Ce bilan tombe au contraire à zéro si le non renouvellement du parc est couplé avec un programme d'incinération du plutonium [5]¹².

¹¹ Tout en produisant sur la période environ 3.500 TWh d'électricité ou de l'hydrogène pour les transports.

¹² Le scénario d'introduction d'un parc HTR est le plus efficace pour les stocks d'UOX et de MOX irradié, qu'il élimine. Ceci se traduit cependant par l'accumulation de combustible usé du parc HTR, considéré comme un déchet ultime du fait de la grande résistance de la matrice céramique du combustible utilisé.

Évolution des principaux inventaires selon les scénarios considérés de 2000 à 2110

Fig. 3 Évolution de l'inventaire du plutonium sans emploi et des actinides mineurs

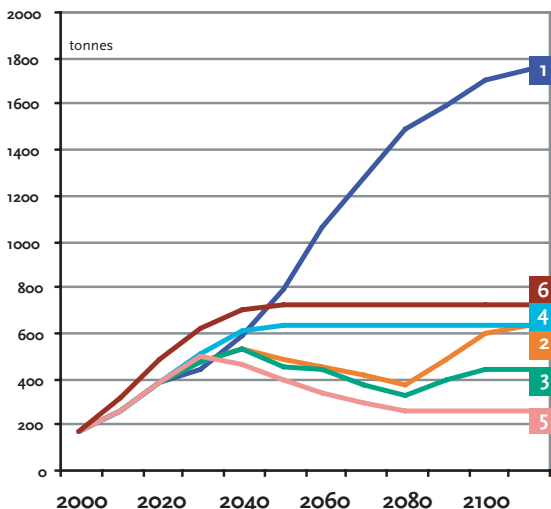


Fig. 4 Évolution de l'inventaire de produits de fission^a

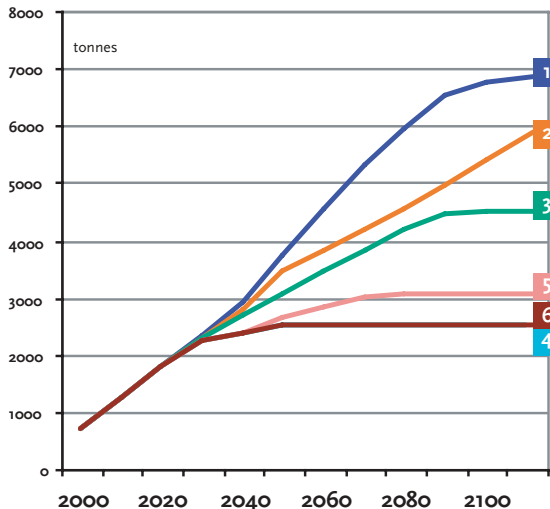


Fig. 5 Évolution de l'inventaire de MOX irradié

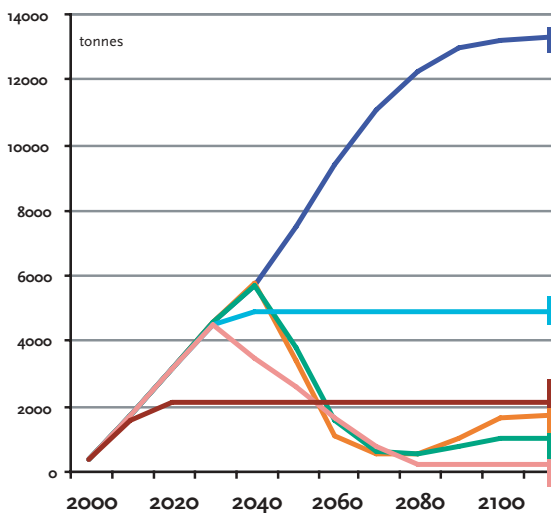
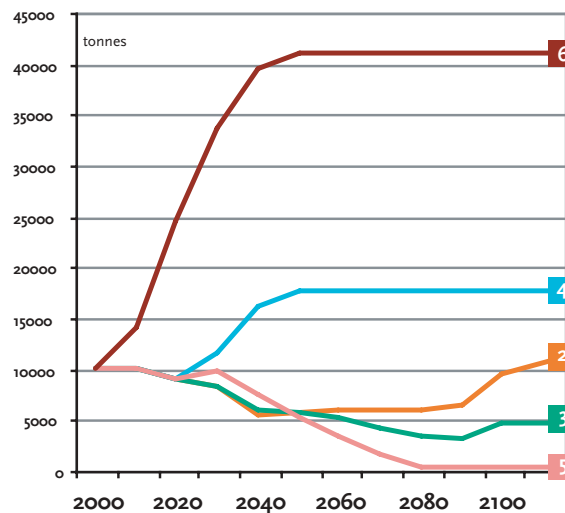


Fig. 6 Évolution de l'inventaire d'UOX irradié^b



Production nucléaire		Technologies nucléaires	
1	Poursuite	Continuité	
2	Poursuite	Rupture	
3	Maintien	Rupture	
4	Sortie	Continuité	
5	Sortie	Rupture	
6	Sortie	Abandon	

a. Les résultats sur les produits de fission sont identiques pour les scénarios 4 et 6.

b. Le scénario 1 (600 TWh EPR) n'est pas représenté pour l'inventaire d'UOX irradié faute d'information suffisante.

Source : d'après rapport annexe au rapport Charpin-Dessus-Pellat sur "La prospective technologique des filières nucléaires", 2000.

3.4. Résultats comparés et difficultés associées aux divers scénarios

On détaille ci-dessous les enseignements que l'on peut tirer de ces scénarios, d'abord globalement puis en comparant entre eux, d'une part les deux scénarios de poursuite [1/2], représentatifs de la stratégie mise en avant par les pouvoirs publics, d'autre part les trois scénarios de sortie [4/5/6]. Outre les indicateurs retenus, l'analyse doit prendre en compte les flux mis en œuvre (et les équipements industriels correspondants) et le cumul de matières autres que celles évaluées, comme autant de contraintes spécifiques aux différents scénarios.

3.4.1. L'influence des options de production électrique

La comparaison des scénarios démontre sans surprise l'importance des options de production électrique, et indique que les stratégies de sortie peuvent conduire globalement à des inventaires moins lourds que la poursuite de l'option nucléaire, à condition toutefois d'adapter à la situation les stratégies technologiques envisagées.

Les quelques décennies de développement du nucléaire en France ont accumulé un large inventaire "existant" de matières nucléaires diverses, auquel s'ajoute un inventaire "engagé" lié à la poursuite d'exploitation du parc nucléaire actuel. Les pouvoirs publics s'appuient aujourd'hui sur l'argument que "le coup est largement parti", pour défendre l'idée qu'une poursuite de la production nucléaire, au moins au rythme actuel et jusqu'à la fin du siècle, est nécessaire pour la gestion de cet inventaire (combinant réduction des déchets ultimes et réutilisation maximale des matières valorisables). Les résultats précédents montrent que cet argument est infondé. Les efforts technologiques déployés pour réduire l'inventaire, inscrivent l'autorité publique et la communauté scientifique dans une logique de poursuite du nucléaire. La réflexion doit au contraire s'ouvrir aux options de sortie du nucléaire – et non à la seule option de "sortie conventionnelle" [4] utilisée comme scénario repoussoir¹³.

Dans l'hypothèse d'une poursuite du développement du nucléaire, centrale dans le raisonnement des acteurs institutionnels, la solution d'un parc tout EPR "moxé" [1] présente un bilan défavorable. Les

promoteurs du nucléaire y répondent par une hypothèse forte de rupture technologique permettant la mise en œuvre d'une stratégie de séparation-transmutation plus poussée que le retraitement actuel et la réutilisation du seul plutonium. Dans le cas jugé comme un des plus favorables du déploiement de RNR optimisés pour cette transmutation [2], et en faisant le pari d'un succès complet, on obtient effectivement un progrès, mis en avant par les pouvoirs publics pour justifier cette stratégie (voir tableau 5). Mais on constate que pour chacun des postes, les stratégies de non renouvellement du parc – qui ne sont pas neutres sur le plan énergétique et induisent bien sûr d'autres types d'efforts¹⁴ – peuvent se révéler beaucoup plus efficaces. Elles peuvent en effet conduire à des **bilans nettement plus faibles et beaucoup plus tôt** (entre 2050 et 2080). D'autant plus que les résultats des scénarios mixtes EPR+RNR [2/3] indiquent une remontée des inventaires de matières nucléaires dangereuses en fin de période – sauf à considérer un nouveau renouvellement du parc à partir de 2080 (ce qui n'est pas envisagé dans les scénarios exposés).

3.4.2. Scénarios de poursuite du nucléaire à long terme et problèmes de gestion associés

La comparaison de deux scénarios de poursuite de l'option nucléaire, respectivement basés sur la continuité des solutions technologiques (parc de réacteurs EPR et poursuite du retraitement) et sur une rupture (parc complété par des RNR et mise en place de la séparation-transmutation) montre un progrès certain sur l'inventaire du second par rapport au premier. Ce progrès à long terme repose toutefois sur un pari, implique une augmentation des risques d'exposition à court et moyen terme, et ne résout que partiellement le problème d'inventaire. Le scénario de poursuite de la prédominance nucléaire avec un parc tout EPR [1] impose la poursuite du retraitement pendant toute la période. Cette stratégie, même si elle est gérée dans des conditions optimales, impose la gestion de stocks d'actinides mineurs, de produits de fission, et de MOX irradié en rapide croissance sur la période comme le montre le **tableau 5**.

¹³ Cette option sert de base de comparaison alors qu'elle présente une incohérence majeure puisqu'elle accumule des matières valorisables sans les valoriser ensuite et présente un bilan matières médiocre.

¹⁴ En particulier une politique sérieuse de sobriété et d'efficacité électrique.

Cette accumulation de stocks croissants accompagne une extension de l'industrie du retraitement et des multiples risques spécifiques qui lui sont associés¹⁵. Elle génère également des quantités importantes d'uranium de retraitement à entreposer (11.000 t en 2004, plus de 40.000 t en 2050, probablement plus de 80.000 t en 2110) en attendant son usage éventuel. Par ailleurs, la sécurisation des stocks de produits de fission et d'actinides mineurs extraits du combustible irradié impose leur vitrification

rapide, tout à fait antinomique avec l'espoir de leur transmutation éventuelle à long terme. Elle implique de fait, sans marge de choix, le stockage définitif (quels qu'en soient les risques) de volumes très rapidement croissants de colis vitrifiés (de l'ordre de 10.000 m³ en 2110). Ce scénario implique enfin l'accumulation de très grandes quantités de combustible MOX qui se traduit par des difficultés supérieures et un allongement de l'entreposage.

Tableau 5 - Projections comparées des scénarios de poursuite nucléaire [1/2]

Scénarios de poursuite du nucléaire	2004	2050		2110	
	Parc actuel	1 Continuité (EPR)	2 Rupture (EPR+RNR)	1 Continuité (EPR)	2 Rupture (EPR+RNR)
Actinides mineurs	41 t	160 t	133 t	295 t	150 t
Produits de fission	900 t	3.700 t	3.430 t	6.820 t	5.800 t
MOX irradié	500 t	7.400 t	3.660 t	13.200 t	1.640 t

Le scénario qui substitue, sur la base du précédent, une partie des EPR par des RNR réalisant la transmutation [2] apporte à l'horizon du siècle **un progrès important** : gain majeur sur le MOX (stocks finaux divisés par huit), gain appréciable sur les actinides (division par deux) et nettement plus modeste sur les produits de fission (baisse de 20 %). Il ne propose en revanche aucune amélioration sur l'uranium de retraitement. Mais ce scénario soulève une série de questions.

- La réussite scientifique, technique, industrielle et économique, dans les délais, de la séparation-transmutation est un **pari** qui implique la possibilité d'un échec qui pourrait créer une situation plus difficile encore que celle du scénario précédent.
- Outre sa faisabilité, la mise en place d'un "multirecyclage" et d'un parc RNR à l'échelle industrielle visée engendre des **risques associés croissants** dont la maîtrise devient très difficile – comme l'a pointé un récent rapport à l'Académie des sciences¹⁶.
- Enfin, il porte en soi une **contradiction forte** : si le déploiement à partir de 2040 d'une industrie de séparation-transmutation s'appuie sur la poursuite d'ici là du retraitement, la prévention implique la vitrification des actinides mineurs (et produits de fission) ainsi générés... les soustrayant par là-même à

une future incinération puisqu'on considère aujourd'hui comme impraticable la reprise ultérieure des matières contenues dans les verres des colis.

3.4.3. Scénario de non renouvellement du parc et problèmes de gestion associés

La comparaison des trois options de sortie, reposant respectivement sur une continuité technologique (poursuite du retraitement), sur une rupture (ajout de réacteurs HTR pour consommer le plutonium) et sur un abandon (arrêt à court terme du retraitement) montre bien le caractère pénalisant de la première. Plus cohérentes vis-à-vis du principe de valorisation, les deux autres se traduisent par des bilans contrastés.

Les trois options de non renouvellement du parc actuel en fin de vie se distinguent par des gestion très différentes de l'héritage de matières issues de ce parc. **Le tableau 6** en rappelle les conséquences en termes de bilan final, autour de 2045 ou de 2075 selon les cas.

¹⁵ Risques liés aux usines de retraitement et de fabrication de MOX (déchets, rejets, accidents, attentats), aux transports de matières nucléaires (en particulier du plutonium), etc.

¹⁶ Par l'ancien Haut-commissaire à l'énergie atomique, Daustray, R., Les isotopes du plutonium et leurs descendants dans le nucléaire civil, Rapport à l'Académie des sciences, 2004. Il insiste sur la multiplication des usines, des manipulations, des transports que suppose une stratégie de séparation-transmutation.

Tableau 6 - Inventaire des matières nucléaires en fin de vie du parc actuel dans les trois scénarios de non renouvellement du parc [4]/[5]/[6]

Scénarios de sortie du nucléaire	2004	Fin ~2045	Fin ~2075	Fin ~2045
	Parc actuel	[4] Continuité (retraitement)	[5] Rupture (retraitement+HTR)	[6] Abandon (arrêt retraitement)
Actinides mineurs	41 t	112 t	145 t	112 t
Produits de fission	900 t	2.500 t	3.025 t	2.500 t
MOX irradié	500 t	4.835 t	190 t	3.030 t
UOX irradié	n.d.	15.600 t	190 t	41.000 t

La première option [4] est la plus pénalisante : elle articule à deux horizons de temps des décisions incohérentes entre elles, consistant à accumuler des matières valorisables (décision de poursuivre le retraitement aujourd'hui) pour renoncer ensuite à les valoriser (décision de non renouvellement lorsque cette échéance se présentera). Elle impose ainsi la poursuite des opérations industrielles d'aval du cycle, et les risques associés, sans en tirer de bénéfice ; au contraire elle augmente considérablement les problèmes d'entreposage et au final de stockage de MOX irradié.

L'option d'arrêt du retraitement [6], en renonçant d'emblée à toute valorisation, est plus cohérente. Elle réduit les risques à court terme avec la fermeture dès 2010 des usines de l'industrie du plutonium et l'arrêt des transports associés. Elle implique en revanche de consentir au futur stockage, réversible ou non, à la fois des matières et déchets hérités du retraitement (combustibles MOX en quantités importantes, déchets vitrifiés) et des combustibles UOX soustraits au retraitement. Elle suppose également une reprise, sans valorisation, des stocks d'uranium de retraitement et surtout de plutonium séparé subsistant en 2010.

La troisième option, plus audacieuse, consiste à faire le pari d'une réduction des matières issues du retraitement au-delà de la fin de vie du parc actuel dans un parc de réacteurs dédiés, de type HTR [5]. Elle présente l'avantage de faire tomber l'inventaire final de MOX irradié et de plutonium et d'actinides mineurs à des valeurs très faibles. De plus, le combustible utilisé des HTR est particulièrement stable et ne suppose probablement pas d'opération supplémentaire avant stockage. Mais cette option suppose la pérennisation des opérations de retraitement pendant encore 60 ou 70 ans, avec les risques que cela comporte, et la mise en route et l'exploitation d'une petite série de HTR. Les trois options décrites ci-dessus présentent

également, vis-à-vis des solutions de gestion, quelques caractéristiques communes. En premier lieu, elles font l'économie du développement incertain de la séparation-transmutation. Ensuite, elles déplacent le choix entre stockage réversible ou non, de considérations sur la possibilité de reprises des déchets vers des critères de confiance à très long terme sur la fiabilité du confinement. Enfin, elles présentent l'intérêt majeur de fixer dès aujourd'hui (à des niveaux divers) la quantité de déchets ultimes, alors qu'elle ne peut l'être dans aucun cas pour les scénarios de poursuite du nucléaire.

3.5. Principaux enseignements et questions ouvertes

3.5.1. Synthèse des difficultés associées aux différents scénarios

Aucune stratégie n'évite des difficultés importantes à court, moyen ou long terme, mais de grandes marges de choix existent sur la nature et l'intensité des difficultés auxquelles on peut se trouver confronté. En particulier, les stratégies se distinguent par des contraintes très différentes dans les flux et l'horizon temporel de la gestion du plutonium et de ses descendants.

Tableau 7 - Intensité des contraintes de gestion des différents scénarios sur les deux siècles qui viennent

Scénarios	Contraintes ^{a,b} Risque retraitement	Séparation transmutation	Entreposage MOX	Stockage déchets C	Stockage UOX
1 Poursuite / continuité	●●●	●	●●●●	●●●●	●●
2 Poursuite / rupture	●●●●	●●●●	●●	●●●	●●
4 Sortie / continuité	●●	Non	●●●	●●●	●
5 Sortie / rupture	●●●	Non	Non	●●	Non
6 Sortie / abandon	●	Non	●	●●	●●●

a. On prend en comptes les principales contraintes suivantes : la gestion des risques du retraitement-recyclage, l'obligation de réussite d'un programme de séparation-transmutation, la nécessité d'un entreposage de combustible MOX, d'un stockage de déchets vitrifiés (C), et d'un stockage de combustibles UOX.
 b. On distingue quatre niveaux de contrainte : ● faible, ●● significative, ●●● forte, ●●●● majeure.

Le tableau 7 montre qu'aucune des stratégies n'évite un certain nombre d'inconvénients à court, moyen ou long terme. Leur nature et leur intensité sont néanmoins très variables.

Mais la question principale, jamais abordée par les pouvoirs publics, qui émerge à la lecture de ce tableau, est celle des flux de plutonium et de ses descendants sous leurs différentes formes (séparées ou non) au cours des 100 années qui viennent. On voit bien que l'intensité des contraintes de gestion à terme séculaire est très directement liée à l'intensité des flux correspondants. Les différentes stratégies de poursuite du nucléaire butent principalement sur cette question. Celles qui n'envisagent pas de rupture technologique majeure et se bornent au mono recyclage du plutonium sous forme de MOX butent sur les problèmes de gestion de ce combustible irradié. Celles qui acceptent le pari de la rupture technologique se heurtent dans un premier temps (jusqu'en 2050) au même problème tout en amplifiant considérablement les risques inhérents à l'industrie des combustibles. Les stratégies de non renouvellement du parc permettent de quantifier précisément ces contraintes en fonction des stratégies techniques retenues et les allègent significativement dans tous les cas.

3.5.2. Le risque d'une fuite en avant

La stratégie de transmutation par des RNR privilégiée par certains acteurs repose sur des omissions majeures concernant les transferts de risque entre long et court terme, sur une exigence implicite de poursuite du nucléaire à des niveaux élevés, et sur un double pari de réussite technologique et de maîtrise des risques associés à un système industriel extrêmement complexe.

Bien qu'elle s'avère relativement inefficace en regard

des problèmes de matières nucléaires dangereuses, la stratégie d'introduction d'un parc RNR pour assurer la transmutation à partir d'un parc EPR semble privilégiée par une partie des acteurs publics du débat. Ce choix repose à la fois sur des omissions majeures, sur une exigence implicite et sur un double pari :

- Des **omissions majeures** puisque, en ne prenant en compte que les "déchets ultimes" les pouvoirs publics omettent de traiter une grande partie des problèmes que posent à moyen terme une série de matières nucléaires dangereuses pour ne se concentrer que sur des questions de très long terme.
- Une **exigence implicite** de poursuite d'une politique pérenne de production nucléaire à des niveaux élevés sur plus d'un siècle, sans laquelle les stratégies techniques préconisées se révèlent totalement contre performantes.
- Un **double pari**, celui de la réussite des recherches sur les réacteurs régénérateurs à haute température, le recyclage et la transmutation des actinides et des produits de fission, et celui de la possibilité réelle d'introduction massive, dès 2040, de ces technologies dans le parc français de réacteurs.

On voit là apparaître la contradiction dans laquelle se sont placés les pouvoirs publics. Comme la maîtrise de l'inventaire du plutonium et des actinides mineurs est un passage obligé, puisqu'il n'est pas possible de présenter à l'opinion publique des inventaires de matières nucléaires dangereuses constamment croissants, ils sont contraints de présenter la stratégie de recyclage du plutonium et des actinides mineurs qu'elles qu'en soient les difficultés, les délais et les chances réelles de succès. Certains promoteurs du nucléaire ont d'ailleurs tellement bien intégré cette exigence de succès qu'ils proposent le démarrage d'un vaste programme de réacteurs type EPR, destiné principalement à constituer le stock de plutonium

indispensable à l'alimentation des nouveaux réacteurs des années 2050 !

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'acceptation sociale est acquise pour toute la période, alors, dans 100 ou 120 ans, nous pourrons revenir, après une période "transitoire" semée de risques et de dangers importants, à une situation analogue à celle que nous laisserait le parc d'aujourd'hui, si on le laissait vivre jusqu'à sa fin naturelle.

4. GOUVERNANCE ET DÉCHETS NUCLÉAIRES

4.1. L'objet du débat

4.1.1. L'alternative de premier rang

Le débat public, dans la forme institutionnelle qu'il connaît en France sous l'égide de la Commission nationale du débat public (CNDP), étend son champ d'investigation à la nécessité, ou à ***l'opportunité***, de l'infrastructure en discussion, va jusqu'à la remise en question du projet lui-même et inclut la présentation de solutions alternatives. Il doit en être de même pour les déchets nucléaires même si ce ne sont pas des "objets nouveaux" puisque l'industrie nucléaire, tant civile que militaire, en a déjà produit en abondance. Mais cette existence de l'objet n'est pas une raison suffisante pour que l'on ne discute pas de la poursuite de sa production. Les "inconvenients" de l'utilisation de l'énergie nucléaire – notamment pour la production d'électricité – sont connus : production de déchets radioactifs, risque d'accident et de prolifération. Sans devoir étendre le débat à l'ensemble de la politique de l'énergie, on ne peut donc refuser de prendre en considération l'opinion selon laquelle la production de déchets radioactifs est considérée comme un "inconvenient" dont la gravité doit conduire à l'abandon de la production d'électricité d'origine nucléaire.

La gouvernance traite des ***choix*** et des ***alternatives possibles*** et de la façon de prendre les décisions par un processus démocratique : l'option de non production des déchets radioactifs est une option de premier rang, exactement au même titre que celle qui prône que l'électronucléaire doit être une composante majeure du système énergétique français.

4.1.2. La gestion des déchets nucléaires

Il existe actuellement des déchets nucléaires et même une option d'arrêt de l'électronucléaire ne permettrait pas de faire l'impasse sur la gestion des déchets existants ou qui seraient produits dans un avenir proche. Les questions en débat se divisent donc en deux catégories :

Première catégorie :

- Quelle est la situation actuelle des déchets nucléaires et quels sont les risques qu'ils entraînent ?

- Qu'en est-il des déchets nucléaires produits par le retraitement des combustibles irradiés étrangers ?
- Quelles sont les alternatives de gestion des déchets existants et de ceux qui doivent être produits dans l'avenir par le parc nucléaire existant et les risques qui leur sont associés ?

Deuxième catégorie :

- Quels sont les scénarios alternatifs de production de déchets nucléaires en cas de poursuite de l'option nucléaire en fonction des choix techniques (types de réacteurs et traitement des déchets) ?
- Quelles sont les solutions proposées pour la gestion à moyen et long terme de ces déchets et le degré de connaissance de la faisabilité et de la fiabilité de ces solutions ?
- Quels sont les risques qu'elles présentent (en fonction notamment du degré d'incertitude sur les réponses aux questions précédentes) ?

Dans ce débat, il est crucial que nos concitoyens puissent se prononcer en connaissance de cause non pas seulement sur le sort à très long terme des déchets ultimes de l'industrie nucléaire, mais aussi et peut être surtout sur leur acceptation ou non, pour un nombre indéterminé et indéterminable de décennies, des risques induits par les masses croissantes de plutonium et d'autres matières observées dans tous les scénarios de poursuite du nucléaire, quelles que soient les technologies proposées.

4.2. La légitimité et la nature du débat

La question des déchets radioactifs, comme celle du nucléaire en général, est très souvent présentée comme extrêmement complexe, voire incompréhensible. Le nucléaire ayant été et restant en grande partie un "***domaine réservé***", il est exact que "le niveau de connaissance des Français sur ces sujets reste limité". Dans un pays où l'électricité nucléaire a une place aussi importante, on est effectivement surpris de la pauvreté et de la rareté des ouvrages existant en français sur le sujet, si l'on excepte les (rares) publications "orientées" issues des entreprises et organismes promoteurs. De ce fait, il existe une forte tentation à prétendre

que le débat se limite à une confrontation entre “ceux qui savent” et “ceux qui ne savent pas”, les premiers étant majoritairement issus des organismes promoteurs et les seconds du “grand public”, avec un grain de condescendance vis-à-vis de cette catégorie vaste et indistincte. Se produit alors un glissement facile d’attribution de la sacro-sainte “rationalité” aux premiers et de la douteuse “irrationalité” aux seconds. En réalité, l’une et l’autre sont assez équitablement réparties entre toutes les catégories de la société et l’acceptation de ce fait est évidemment un préalable à la qualité d’un débat. Cela n’ôte rien à l’intérêt de la connaissance des phénomènes mais il faut, s’il doit y avoir **“partage des connaissances”**, que ce partage soit équitable. Cette connaissance, indispensable au débat, doit être réciproquement acceptée : elle est le cadre nécessaire à une discussion à égalité car elle permet d’utiliser un langage commun pour exprimer les opinions et les choix de chacun.

Ce cadre permet de distinguer de façon relativement précise ce qui relève de la mesure et de l’expertise qui permettent l’évaluation des risques ainsi que la formulation des alternatives (à tous les stades du processus) et ce qui relève de la décision politique, au premier rang de laquelle se situe **“l’acceptation du risque”** qui ne relève pas de l’expert mais du citoyen.

C’est au premier niveau qu’intervient bien sûr la question des indicateurs. La **définition d’indicateurs communs** pour donner la mesure de la situation des déchets et matières valorisables est une étape préliminaire indispensable du débat. Mais la connaissance ne se limite pas aux questions scientifiques et techniques : elle inclut la compréhension des considérations éthiques, de l’appréciation “personnelle” des risques, de la vision de l’avenir, de la responsabilité citoyenne. La sociologie, la philosophie et la morale ont autant de place dans le débat que la science du physicien ou celle de l’ingénieur.

Si la question fondamentale posée par les déchets nucléaires est bien celle d’un “legs” presque “éternel” aux générations futures, de produits extrêmement dangereux fabriqués par l’homme et déposés quelque part sur ou sous la terre avec un degré de protection qui ne peut être garanti que dans l’état actuel des connaissances, on voit bien que le débat est fondamentalement “politique” et citoyen.

4.3. La question centrale de l’expertise et de son rôle

4.3.1. Expertise plurielle et contradictoire

Le partage des connaissances et la création d’un cadre commun de discussion passe par la reconnaissance commune d’une “expertise” en qui l’on puisse avoir confiance. C’est la seule façon de séparer, d’un commun accord, les faits et les opinions. Le point de départ de l’expertise, dans tous les domaines matériels, est la mesure : si l’on s’entend sur la mesure, un grand pas est fait. Mais, surtout si les phénomènes sont complexes (ce qui est bien le cas du passage de l’émission radioactive au risque pour l’homme et pour la biosphère) on ne peut échapper au traitement des données, aux modèles, bref à “l’interprétation”. L’expertise peut se définir comme la combinaison de la **compétence**, de **l’honnêteté intellectuelle** et de la **liberté d’expression**. On utilise souvent le mot “d’indépendance” : il est certain que les “experts” issus des organismes promoteurs du nucléaire ne peuvent pas revendiquer cette qualité car, si l’on peut admettre leur compétence et leur honnêteté intellectuelle, ils sont, par profession, tenus de défendre le nucléaire. Par contre, il est essentiel qu’il existe des organismes publics dont l’expertise, avec ses trois caractéristiques, soit affirmée et encouragée par les pouvoirs publics : dans le cas du nucléaire, cet organisme doit être l’IRSN, dont **l’indépendance** vis-à-vis des entreprises et organismes promoteurs (dont le CEA) et de l’administration chargée du contrôle et le **devoir d’informer** doivent être en permanence réaffirmés et confortés. Reste que la seule méthode qui permette d’assurer à la fois la qualité professionnelle de l’expertise et la confiance que l’on peut lui accorder est l’exercice permanent de l’expertise plurielle et contradictoire. Cela signifie très pratiquement :

- que d’autres organismes que les traditionnels promoteurs du nucléaire soient impliqués dans l’expertise nucléaire (CNRS, universités, bureaux d’études) : il y a eu des progrès (CNRS, CNE), encore insuffisants (le nucléaire reste largement une “chasse gardée”).
- que l’expertise “indépendante” et notamment l’expertise associative soit encouragée, c’est-à-dire très concrètement systématiquement associée et rémunérée pour ses prestations.

4.3.2. Responsabilité de l'expertise

L'usurpation de la *fonction de décision* par les organismes et les entreprises a été largement reconnue historiquement dans le domaine nucléaire. La facilité avec laquelle cela s'est produit ne vient pas seulement du pouvoir d'influence de leurs dirigeants et de leur consanguinité avec la haute administration mais aussi du rôle que s'arroge, de façon beaucoup plus générale, "l'expert" vis-à-vis du "politique".

L'expert, ou présumé tel, a pris l'habitude de présenter au décideur politique une seule solution, présentée comme "l'optimum". C'est vrai dans le domaine technique, cela l'est encore plus dans le domaine économique. On l'a vu dans le choix des filières nucléaires, dans les prévisions extravagantes de consommations d'électricité au milieu des années 70, etc. Volens, nolens, les politiques ont laissé faire, par paresse (c'est bien commode d'avoir à choisir entre "le nucléaire ou le chaos"), ou par intérêt.

Or il existe toujours des *solutions alternatives*: le devoir du politique serait d'exiger des experts la présentation systématique d'alternatives, élaborées et discutées de façon plurielle et contradictoire. Il devrait être de l'honneur des experts de prendre d'eux-mêmes cette initiative.

En tout état de cause et quelle que soit la bonne volonté de chacun, le débat n'a de sens que si la construction et la présentation de ces alternatives est à la base de la discussion. Il est donc indispensable que les alternatives soient étudiées et présentées avec les mêmes moyens que la solution préconisée par le promoteur. Ce n'est que dans un système ouvert d'un éventail d'alternatives que la décision politique a un sens.

4.4. L'élaboration de la décision

Le processus de décision doit être élaboré en tenant compte des spécificités de la question des déchets radioactifs.

4.4.1. Le temps et l'espace

Le débat sur les déchets radioactifs est multidimensionnel.

D'une part, il rejoint le *débat "classique"* de la construction d'une installation à risque particulière dans le cadre d'une politique nationale (d'Etat ou d'entreprise). Toute considération sur

les solutions de gestion à l'échelle nationale suppose l'implantation d'une ou plusieurs installations dédiées à leur mise en œuvre, qui s'accompagne à chaque fois d'une série de questions. Où placer cette installation ? Quels critères de choix du site et d'acceptabilité locale et nationale ? Quelle responsabilité locale dans la décision d'implantation ? Comment assurer la prise en charge locale ? Quel lien (solidarité, justice, compensation ?) entre le national et le local ?

D'autre part, il s'en distingue par *l'échelle des durées* d'un entreposage ou d'un stockage de déchets nucléaires, qui soulève des questions très spécifiques. Comment assurer au niveau national le maintien d'un niveau suffisant de compétences sur longue période pour assurer la fonction "gestion des déchets nucléaires" ? Comment assurer les moyens financiers d'assurer cette gestion ? Comment garantir la surveillance et l'entretien locaux ? Comment préserver même la "mémoire" du site, de ses fonctions et de ses risques ?

4.4.2. La réversibilité des choix : la décision en avenir incertain

Vis-à-vis de telles exigences et en tenant compte de la "jeunesse" de la science nucléaire, du caractère incertain des évolutions futures, la seule attitude responsable est l'application du principe de réversibilité :

- Réversibilité dans les choix techniques : possibilité de "reprendre" les déchets nucléaires en fonction des évolutions technologiques.
- Réversibilité dans les décisions : refus de s'engager dans une démarche linéaire d'enchaînement automatique de décisions "gigognes" soigneusement verrouillées.

La prise de décision dans ce domaine ne peut être qu'une "décision en avenir incertain". Cela ne signifie aucunement qu'il ne faut rien faire mais qu'il faut refuser de définir une stratégie et de prendre des décisions en fonction d'un avenir présenté comme certain (comme cela a été trop souvent le cas, par exemple à partir des "prévisions" de consommation d'électricité). Au contraire, la stratégie doit être adaptée à l'éventail des futurs possibles.

4.4.3. L'organisation de la décision, la diversité des acteurs

La prise de décision ne peut être effective que si elle associe, dans le débat et dans l'élaboration des alternatives, l'ensemble des acteurs concernés que l'on peut regrouper en quelques grandes catégories :

- les entreprises et organismes promoteurs ;
- le système institutionnel de décision :
Gouvernement et Parlement ;
- les administrations concernées ;
- les organismes et entités "experts" ;
- les associations environnementales
et les syndicats de travailleurs ;
- les médias ;
- les citoyens intéressés (ceux qui sont
susceptibles de participer aux débats),
au niveau national et au niveau local ;
- les collectivités territoriales concernées
ou susceptibles de l'être.

Le débat public se doit d'être une **"opération pilote"** d'organisation de la discussion et de l'élaboration des éléments de la décision par la rencontre et la réunion de ces différentes catégories d'acteurs.

C'est certainement un processus long et complexe mais il faut que les responsables politiques en comprennent l'importance et la nécessité.

Autant que la présentation et la discussion des différents choix possibles et l'expression des opinions des uns et des autres à leur sujet, le débat public a la responsabilité de proposer une "organisation du débat citoyen sur les déchets radioactifs" qui prendrait la suite du débat public et instaurerait, sur cette question extrêmement délicate, une démarche articulant démocratie participative et démocratie représentative.

