

Note

Le « cycle » du combustible nucléaire français : analyse critique du bilan actuel

Yves MARIGNAC, 15 juillet 2010

Résumé et conclusions

La présente note rassemble différentes réflexions menées autour de l'avis rendu le 12 juillet 2010 par le Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) sur la gestion du « cycle » du combustible. Ces réflexions ont été conduites en partie dans le cadre d'une invitation à participer au groupe de travail mis en place par le Haut comité sur ce sujet, puis pour un travail d'explication, avec plusieurs membres du collège associatif du Haut comité, des réserves émises sur le rapport de ce groupe.

Les réflexions portent sur le degré de réutilisation des matières associées au « cycle » du combustible mis en place par EDF et Areva pour les réacteurs à eau pressurisée (REP) français. **Il s'agit de mettre à l'épreuve des faits l'un des principaux arguments soutenant la stratégie de « retraitement-recyclage » depuis près de 25 ans, selon lequel « 96 % des matières du combustible usé sont recyclées ».** Celles-ci, composées de 95 % d'uranium et 1 % de plutonium sont en effet théoriquement « recyclables », mais il est rigoureusement impossible aujourd'hui de les réutiliser intégralement, et même davantage qu'en faible proportion, dans le parc existant.

Le bilan précis de la réutilisation est difficile à établir pour plusieurs raisons :

- La première porte sur la **complexité globale du « cycle »** du combustible en France, qui combine trois facteurs :
(i) une complexité intrinsèque spécifique au choix du « retraitement-recyclage », qui multiplie les flux et les catégories de matériaux mis en jeu par rapport à une stratégie de « stockage direct » du combustible irradié ;
(ii) la nécessité de prendre en compte le temps, à la fois dans l'évolution du parc nucléaire et de sa gestion, donc des flux et des stocks associés, et dans la réalisation du « cycle » qui s'étale en fait sur plusieurs années ; et
(iii) l'imbrication entre inventaires et bilans français et étranger, liée à l'exécution à l'étranger de certaines étapes du « cycle » français et en France de certaines étapes du « cycle » de clients étrangers.
- La seconde tient à l'**incomplétude des données disponibles** pour identifier précisément, pour chaque étape, chaque matière et chaque site industriel les quantités mises en jeu (flux et stocks). Au total, malgré l'apparente abondance de données disponibles, une majorité des informations nécessaires à l'établissement d'un bilan véritablement complet restent manquantes.
- La troisième est l'**absence de méthodologie comptable partagée** pour établir un bilan fiable de la réutilisation. On développe ici une méthodologie basée sur l'identification des flux sortants et sur la séparation aussi précise que possible des matières dans ces flux en fonction du nombre de fois où elles ont été utilisées en réacteur.

Sans atteindre un véritable bilan de la réutilisation depuis le début du nucléaire français ou même depuis le démarrage du premier réacteur du parc nucléaire actuel, en 1977, les données fournies par EDF dans le cadre du travail du HCTISN permettent toutefois d'établir des bilans, cumulés ou en moyenne annuelle, à partir de 1994, pour les dernières années et en prévisionnel à partir de 2010. On a également développé une estimation du maximum théoriquement atteignable dans les conditions actuelles.

Les estimations sur des flux moyens annuels, passés ou prévisionnels, montrent sans équivoque les limites de la stratégie actuelle :

- **Rapporté au flux entrant d'uranium naturel** qui constitue la matière première du « cycle », **c'est environ 14 % seulement de la matière qui est utilisée une première fois en réacteur.**
- Rapporté à la matière utilisée une première fois, **le taux réel de réutilisation des matières n'a atteint que 1,9 % sur 1994-2008.** Ce taux a progressé pour atteindre 4,0 % dans une gestion supposée à l'équilibre d'EDF en 2009, et **il pourrait être porté jusqu'à 7,8 % dans la gestion prévisionnelle à partir de 2010.** Le maximum théorique dans les conditions actuelles se situe autour de 11,5 %.

Au total, dans les conditions actuelles, **ce sont 97,8 % des matières mises en jeu qui sont chaque année classées « matières valorisables » et entreposées sans aucune perspective immédiate d'emploi.**

1. Contexte de la note

Le Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN) a rendu public le 12 juillet 2010 un avis sur la gestion du « cycle » du combustible¹. Si l'exercice n'a pas véritablement permis d'aboutir à des conclusions partagées, le travail mené entre novembre 2009 et juin 2010 par le Haut comité a pu s'appuyer sur de nombreuses informations rendues publiques à sa demande par les exploitants et les pouvoirs publics. Ces informations, et les échanges auxquels elles ont donné lieu, éclairent d'un jour nouveau le bilan du « cycle » et marquent une nouvelle étape vers l'établissement d'une véritable comptabilité analytique des flux et des stocks qui lui sont associés.

Bien que le travail du groupe se soit d'abord focalisé sur la question des exportations et des importations d'uranium avec la Russie, une réflexion plus large a été développée sur le bilan global du « cycle » du combustible français et sur l'information fournie par les exploitants et les pouvoirs publics sur sa gestion. Cette réflexion, qui n'a pas permis de dépasser certains obstacles par manque de temps et d'un dispositif de travail adapté, a néanmoins fait émerger de nouveaux éléments autour d'une question centrale : celle du taux effectif de « recyclage » des matières mises en jeu.

Cette note rassemble différents travaux réalisés par l'auteur autour du groupe de travail mis en place par le Haut comité pour instruire les deux saisines autour de ces questions du Ministre d'État, ministre de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, et de l'Office parlementaire de l'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST). L'auteur a été invité à sa demande, à partir de mars 2010, à participer au groupe de travail mis en place fin 2009. Il a dans ce cadre transmis différents éléments aux membres du groupe, notamment une note récapitulant ses interrogations sur les orientations du rapport².

Au terme du travail du groupe, WISE-Paris s'est associé aux réserves émises par plusieurs membres du collège associatif du Haut comité (représentants l'Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest, Greenpeace, et France Nature Environnement)³, ne leur permettant pas de donner leur aval au rapport dans lequel ils ont demandé de faire apparaître cette mention : « *Plusieurs membres du groupe de travail, représentants associatifs et experts non institutionnels, tout en saluant les efforts du Haut comité pour faire émerger des informations nouvelles, soulignent que les débats n'ont pas permis, à ce stade, d'aboutir à un état des lieux complet et représentatif. Ils appellent à une poursuite du travail du groupe pour parvenir, sur un certain nombre de points faisant en l'état l'objet d'une présentation partielle, à un véritable consensus ou, à défaut, à l'expression claire d'un dissensus. Ces difficultés sont notamment exprimées dans les différentes contributions qu'ils ont versées aux travaux.* »

Les signataires de ces réserves ont publié, conjointement avec la représentante de l'Association nationale des commissions locales d'information (ANCCLI) au sein du Haut comité, une note justifiant leur position⁴. L'auteur a transmis à ces acteurs associatifs, dans le cadre de la préparation de cette note explicative, deux notes de travail⁵. Ce sont ces trois notes du 23 juin, du 10 et du 11 juillet qui sont compilées ici, complétées de quelques éléments d'introduction, de prolongement de l'analyse et de conclusions.

2. Enjeu associé au bilan du « cycle »

L'industrie nucléaire française a déployé depuis le milieu des années soixante-dix une stratégie de retraitement commercial la plus poussée au monde. Initialement destinée à nourrir le développement d'un parc de réacteurs de type « surgénérateurs », cette stratégie a été poursuivie malgré l'échec de cette filière, marqué par l'arrêt définitif de Superphénix en 1998.

L'industrie a dès la fin des années quatre-vingt mis en œuvre, par défaut, une réutilisation des matières issues du retraitement dans le parc de réacteurs à eau pressurisée existant (combustible « mixed oxides », ou MOX pour le plutonium et combustible URE pour l'uranium de retraitement), avec une double justification. La première porte

1. HCTISN, *Avis sur la transparence de la gestion des matières et des déchets nucléaires produits aux différents stades du cycle du combustible*, 12 juillet 2010.

2. Y. Marignac (WISE-Paris), *Le « cycle » du combustible français : un bilan officiel en trompe-l'œil*, note de travail diffusée aux membres du groupe de travail du Haut comité, 23 juin 2010.

3. Voir le communiqué commun des représentants de l'ACRO, Greenpeace et FNE au sein du HCTISN : « Areva et EDF forcées de reconnaître que le taux de recyclage du nucléaire n'est pas de 96 % mais de 12 % ! », 13 juillet 2010.

4. *Transparence et gestion du « cycle » du combustible : un travail imparfait et inachevé*, note explicative sur les réserves émises par plusieurs membres du groupe de travail, ne leur permettant pas de donner leur aval à l'avis du Haut comité pour la transparence et l'information sur la sécurité nucléaire sur la transparence de la gestion du « cycle » du combustible, 12 juillet 2010.

5. Y. Marignac (WISE-Paris), *Le « cycle » du combustible français : bilan des données EDF sur 1994-2008*, 10 juillet 2010, et Y. Marignac (WISE-Paris), *Le « cycle » du combustible français : évolution des flux annuels, 1994-2010*, 11 juillet 2010.

sur l'intérêt de retirer le plutonium de l'inventaire des déchets à placer en stockage géologique, compte tenu de sa contribution dominante à la radiotoxicité à long terme du combustible irradié. La seconde, sur l'économie d'uranium naturel engendrée par la réutilisation.

L'efficacité de cette stratégie est en général résumée par un chiffre, décliné dans toute communication officielle sur le sujet : grâce au retraitement, « 96 % des matières du combustible usé sont recyclées » (soit 95 % d'uranium et 1 % de plutonium, ne laissant que 4 % de déchets « ultimes » vitrifiés et destinés au stockage géologique)⁶. La loi n°2006-739 du 28 juin 2006 de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs, préconise sur la base du même argument de rechercher « *la réduction de la quantité et de la nocivité des déchets radioactifs (...) notamment par le traitement des combustibles usés et le traitement et le conditionnement des déchets radioactifs* ». Elle constitue dans la pratique un encouragement à l'entreposage en vue de leur recyclage, même si celui-ci n'est pas envisagé ou même possible à court ou moyen terme, de tout matériau contenant de l'uranium et du plutonium ; elle autorise pour cela à leur donner le statut de « matières valorisables », par opposition à celui de déchets.

Alors qu'une grande partie de l'uranium et du plutonium ne sont pas réutilisés actuellement, la réalité du chiffre de 96 % devient dans ce dispositif secondaire. Sous couvert du statut de matière valorisable, l'uranium ou le plutonium qui ne sont pas réutilisés dans la situation actuelle restent officiellement « recyclés », au sens où leur réutilisation est théoriquement prévue, peu importe avec quelle vraisemblance, dans quelles conditions et à quel horizon de temps. La terminologie employée, en commençant par le terme même de « cycle », et la qualification de « cycle fermé » appliqué à la situation actuelle, et la perspective des réacteurs dits de « 4^{ème} génération » pour mettre en œuvre cette réutilisation font le reste.

Une évaluation sérieuse du bilan actuel de la réutilisation des matières apparaît donc indispensable afin de confronter le discours officiel à la réalité et de mettre en perspective les conséquences à moyen et long terme des orientations suivies. De nombreux exercices ont permis de progresser dans la connaissance des informations nécessaires à la réalisation d'un bilan objectif. Le travail mené par le Haut Comité à la transparence et à l'information sur la sécurité nucléaire (HCTISN), dernier en date, apporte des informations nouvelles sans permettre toutefois de tirer un bilan véritablement précis et complet.

3. Complexité du « cycle »

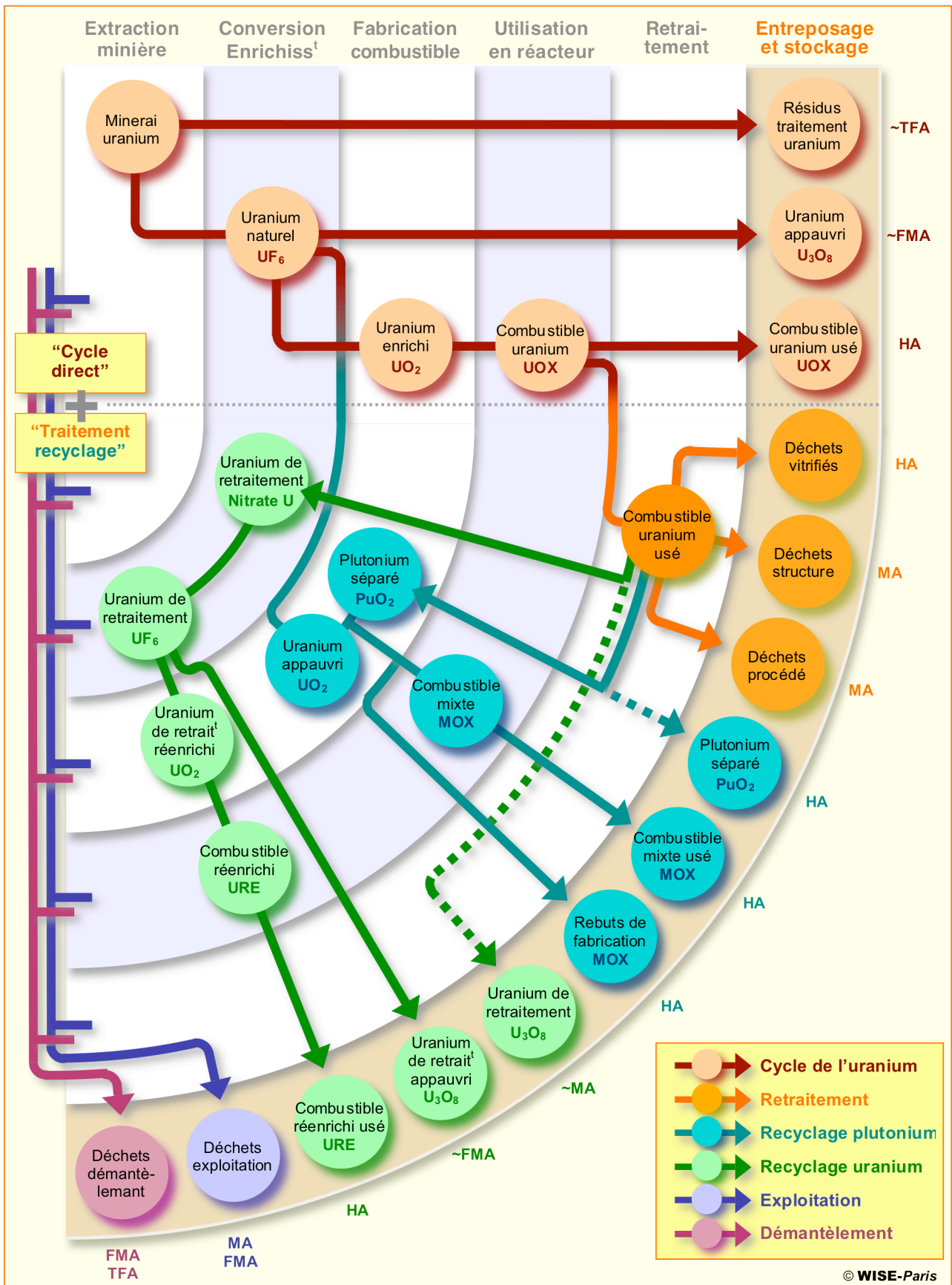
Les données acquises au fil des années, renforcées par les informations fournies par les exploitants et les administrations au HCTISN, **témoignent avant tout de la complexité du « cycle » du combustible en France aujourd'hui**. Cette complexité s'exprime à plusieurs niveaux :

- *la complexité intrinsèque du « retraitement-recyclage »*, illustrée par la **figure 1** : la stratégie dite de « retraitement-recyclage » (ou « cycle fermé ») génère par rapport à la stratégie dite de « stockage direct » (ou « cycle ouvert ») une multiplication des flux et des stocks nécessaires à l'entreposage de matières et au stockage de déchets sous des formes plus variées ;
- *la prise en compte du facteur temps* : le « cycle » de gestion du combustible n'a cessé d'évoluer au fil du temps. Un inventaire complet devrait d'abord prendre en compte les stocks hérités de la gestion du combustible des filières précédentes, notamment l'uranium des réacteurs uranium naturel-graphite-gaz (UNGG). Il faut ensuite tenir compte des évolutions de la stratégie, et des flux nominaux qui en découlent à chaque étape. Enfin, il faut considérer les variations des flux et des stocks tampons d'une année sur l'autre, et intégrer un nombre suffisant d'années pour représenter des flux réels moyens ;
- *l'imbrication des services et des inventaires entre bilan français et étranger* : la France possède la particularité d'avoir développé l'ensemble des étapes industrielles nécessaires à la chaîne de gestion du combustible en amont et en aval (à l'exception du stockage définitif des déchets à vie longue, qui reste en projet). Toutefois, le système est loin de fonctionner en vase clos à l'intérieur des frontières. D'une part, la France recourt de plus en plus, pour son approvisionnement en matières (l'uranium naturel qui est importé à 100 % depuis 2001) ou pour différents services de conversion ou d'enrichissement, à des services étrangers. D'autre part, la France fournit des services, depuis la conversion et l'enrichissement jusqu'au retraitement et à la fabrication de MOX, à de nombreux clients étrangers. Dans les deux cas, il n'est pas toujours possible, dans les données disponibles, de distinguer les flux correspondants de matières à une étape ou les stocks associés, d'autant que certaines étapes s'accompagnent d'un transfert entre inventaire français et étranger (l'uranium appauvri devient par exemple propriété de l'enrichisseur).

6. On lit par exemple, à la date de publication, sur le site internet du groupe Areva : « *Areva a développé des solutions permettant de recycler 96 % du combustible usé et d'utiliser l'uranium et le plutonium qu'il contient pour la fabrication de nouveaux combustibles tels que le "MOX"*. »

<http://www.areva.com/FR/activites-1232/domaines-d-activite-recyclage-et-valorisation-du-combustible-use.html>

Figure 1 – La complexité intrinsèque du « retraitement-recyclage » et les entreposages^a associés



a. On représente ici l'ensemble des « déchets » placés en stockage et des « matières valorisables » dont tout ou partie est placé en entreposage dans l'attente d'une réutilisation non définie. On précise pour chaque type de déchet / matière la catégorie à laquelle elle appartient(drai)t dans la classification des déchets radioactifs (HA haute activité, MA moyenne activité, FMA faible à moyenne activité, TFA très faible activité).

4. Incomplétude du bilan

Du fait de ces multiples facteurs de complexité, un grand nombre de données est nécessaire pour établir un bilan réellement exhaustif du « cycle » du combustible français aujourd'hui. Cette exhaustivité est non seulement un objectif en soi en terme de mise à disposition de l'information, mais aussi un passage obligé pour construire une comptabilité analytique précise permettant, à terme, de donner une représentation simplifiée, synthétique mais fidèle, de ce bilan complet.

Un bilan complet devrait permettre d'identifier, à chaque étape du cycle, pour chaque site français ou étranger et chaque matière concernée par cette étape :

- le flux de l'année. Il peut s'agir d'un flux entrant, en fonction du ou des sites de provenance, d'un flux interne (processus de transformation, gestion du stock volant, transfert d'une partie à une autre de l'installation...), ou encore d'un flux sortant, en fonction du ou des sites de destination. Par ailleurs, l'appréciation d'un flux moyen nécessite de disposer de cette donnée pour plusieurs années ;
- l'état du stock à une date fixe (par exemple en fin d'année), pour les étapes où il existe un stock tampon, un entreposage ou un stockage ;
- la propriété, et le cas échéant la responsabilité de gestion lorsqu'elle s'en distingue, en lien avec l'identification des prestataires et clients français et étrangers concernés par cette étape ;
- l'état physique, incluant l'ensemble des informations pertinentes en fonction de chaque étape, telles que la forme chimique ou la forme de conditionnement.

Les informations disponibles, y compris dans le cadre du travail du HCTISN (à l'exception de quelques données d'EDF), ne fournissent en général qu'une partie de ces renseignements nécessaires à l'identification complète des flux. Dans la plupart des cas, les données disponibles pour une étape et une matière données sont plus ou moins incomplètes en regard de ces différents critères ; dans certains cas, toutefois, aucune donnée n'est fournie (cas par exemple des rebuts de fabrication du combustible MOX). **Au total, malgré l'apparente abondance de données fournies au titre de la « transparence », une majorité des informations nécessaires à l'établissement d'un bilan véritablement complet restent manquantes.**

5. Bilan en flux de la stratégie de « retraitement-recyclage »

Bien qu'incomplet, le bilan tiré par le HCTISN autorise une première approche en termes de synthèse des flux. Le rapport propose une vision des flux moyens annuels moyens sur les trois dernières années complétée des flux théoriquement mis en place à partir de 2010 dans le cadre des nouveaux accords sur le « retraitement-recyclage » entre EDF et Areva (une synthèse est présentée plus loin, dans le [tableau 2](#)). Ces flux, bien que contestables dans leur détail, fournissent des ordres de grandeur suffisamment approchants pour se livrer à quelques calculs.

Ces données permettent en particulier de calculer le taux effectif actuel de recyclage des matières. Le pourcentage obtenu dépend bien entendu de la base de calcul retenue. Le bilan indique que, dans la situation actuelle, 1 033 t de combustible à l'uranium enrichi (UOX) sont chargés dans les réacteurs chaque année, et que leur retraitement et la réutilisation des matières fournit 37 t d'URE et 100 t de MOX. Ainsi, **sur un total de 1 170 t de combustible rechargé chaque année, 137 t est fabriqué avec des matières réutilisées, soit un total de 12 % environ.** Le bilan visé à partir de 2010 porte ce chiffre à 195 t (dont 75 t d'URE et 120 t de MOX) pour 1 170 t, soit un ratio de 17 % environ.

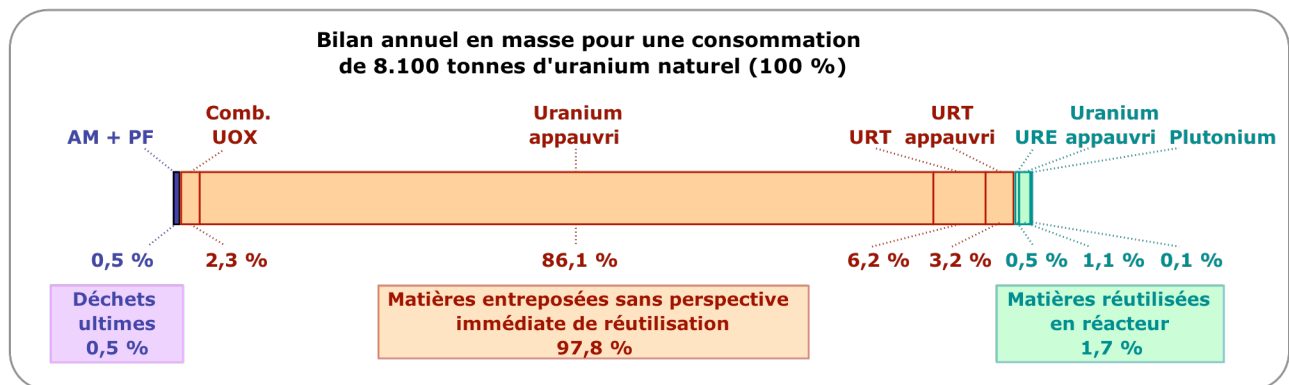
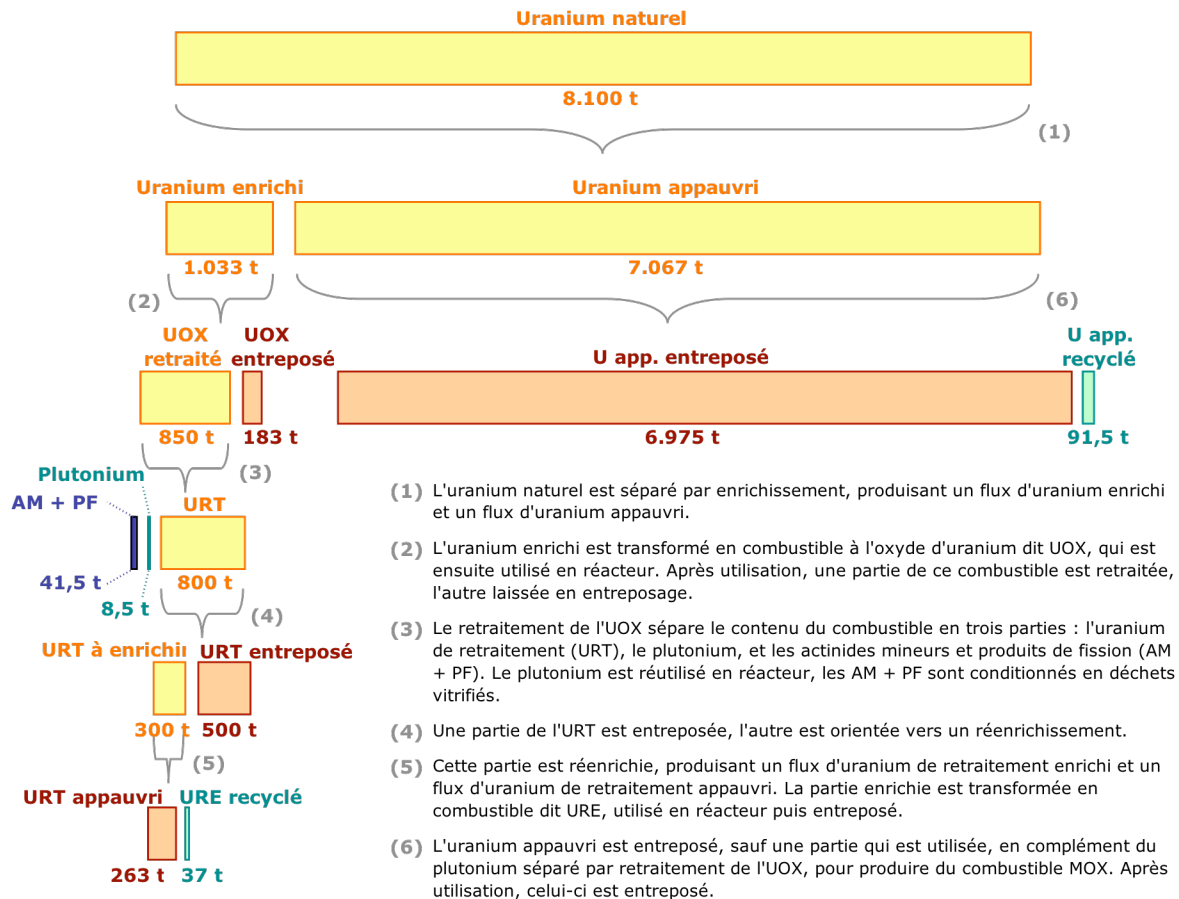
Cette base de calcul est celle qui permet d'estimer l'économie d'uranium naturel réalisée par la stratégie de « retraitement-recyclage ». Ainsi, il faut aujourd'hui 8 100 t d'uranium naturel pour produire 1 033 t d'UOX (soit 7,84 t pour 1 t), et le recyclage économise environ 137 t d'UOX qui représenteraient 1 075 t d'uranium naturel supplémentaire pour un total de 9 175 t, d'où on retrouve l'économie de 12 %. De même, dans les flux théoriquement visés à partir de 2010, il faut 7 600 t d'uranium naturel pour 975 t d'UOX (soit 7,79 t pour 1 t) et 1 520 t sont économisées par la réutilisation de matières, soit 17 % d'économie.

Ce calcul repose toutefois sur une logique très différente de celle présentée avec l'argument des 96 % de matières recyclées, qui porte sur le pourcentage de réutilisation des matières issues du combustible usé. Les chiffres fournis permettent pourtant de confronter cet argument à la réalité. Les matières issues du combustible déchargé chaque année qui sont effectivement réutilisées en réacteur représentent dans les flux moyens des trois années passées un total de 45,5 t par an, correspondant à 8,5 t de plutonium entrant dans la composition du MOX et 37 t d'uranium de retraitement ré-enrichi entrant dans la composition de l'URE. On décompte ici les 91,5 t d'uranium appauvri entrant dans la composition du MOX, dans la mesure où cette quantité n'est pas issue du retraitement. **Ainsi, ce sont 45,5 t sur 1 170 t déchargées chaque année, soit 3,9 %, qui sont effectivement réutilisées, au sens de rechargées en réacteur, au lieu des 96 % annoncées !** Ce taux doit être porté, à partir de 2010, à 85,5 t sur 1 170 t (10,5 t de plutonium plus 75 t d'uranium de retraitement ré-enrichi), soit 7,3 %...

Ce calcul reste insatisfaisant dans la mesure où il ne prend que partiellement en compte la réutilisation. Une estimation réellement complète devrait inclure la réutilisation de l'uranium appauvri, et pour cela prendre comme base de calcul la quantité d'uranium naturel consommée chaque année, qui est la véritable donnée d'entrée du « cycle ». La **figure 2** résume le bilan qui s'établit, selon les flux moyens estimés par le HCTISN, dans le régime actuel du « cycle » du combustible français. **On observe que sur 8 100 t d'uranium naturel entrant chaque année dans le « cycle », un total de 137 t, soit seulement 1,7 %, est effectivement réutilisé en réacteur.** Dans les flux prévus à partir de 2010, ce total serait porté à 195 t sur 7.600 t, soit environ 2,6 %.

À l'inverse, compte tenu de la formation au sein de la matière nucléaire, au cours du processus, de 0,5 % environ de déchets ultimes (produits de fission PF et actinides mineurs AM), **ce sont 7 921 t sur 8 100 t au départ, soit 97,8 % du total, qui sont classées « matières valorisables » et entreposées sans aucune perspective immédiate de réutilisation.** Ce taux serait abaissé à 96,9 % dans les flux prévus à partir de 2010.

Figure 2 – Bilan de la réutilisation de matières nucléaires dans le « cycle » du combustible actuel^a



a. Les flux représentés correspondent aux données sur les flux moyens des années 2007-2009 fournies par EDF dans une note de novembre 2009 au HCTISN. Ces données ne font pas figurer l'existence de deux flux supplémentaires vers des entreposages : un flux de plutonium séparé non réutilisé, et un flux de rebuts de fabrication du combustible MOX impropres à l'utilisation.

6. Bilan cumulé de 1994 à 2008

Les calculs menés sur la base de 2007-2009 et des prévisions à partir de 2010 ne sont toutefois pas représentatifs de l'écart qui a pu séparer, sur une période plus longue, les équilibres sur papier et la réalité des flux de matières attachés à la gestion du combustible d'EDF. En particulier, une période plus longue permet d'apprécier l'effet cumulatif des retards et des difficultés observés dans la mise en œuvre de la stratégie de réutilisation des matières dans les réacteurs actuels, telle qu'elle a pu être décidée et progressivement développée du milieu des années quatre-vingt au milieu des années quatre-vingt-dix.

EDF a produit dans le cadre du groupe de travail mis en place par le Haut comité une note qui fournit un certain nombre d'informations, notamment les données annuelles et cumulées sur une période de quinze années, allant de 1994 à 2008, pour certains postes du « cycle » du combustible⁷. Les calculs sur le taux de « recyclage » qui ont été proposés au groupe de travail du HCTISN sur la base des flux 2007-2009 d'une part et des flux prévisionnels à partir de 2010, détaillés ci-dessus, peuvent être appliqués à cette période. L'analyse du niveau effectif de réutilisation des matières à partir de données sur les flux pour la période 1994-2008 ne fournit pas un bilan complet sur le parc de réacteurs actuels, dont les premières tranches ont été mises en service en 1977. Le cumul sur cette période, qui a vu la montée en puissance de l'utilisation du combustible MOX, avec le passage de 7 à 20 réacteurs « moxés », et le début de l'utilisation du combustible URE⁸, apporte néanmoins un éclairage sur l'inertie du système.

Le **tableau 1** rassemble les données fournies par la note d'EDF sur les flux aux principales étapes du « cycle » du combustible associé au fonctionnement du parc français sur ces quinze années. Bien qu'EDF fournisse dans cette note une quantité importante d'informations, dont certaines n'avaient pas été rendues publiques auparavant, les données sont incomplètes. Elles ne permettent pas, à elles seules, de mener les calculs visés sur l'effectivité de la réutilisation des matières. La première étape de l'analyse a donc consisté à compléter ces données par des estimations, déduites des premières ou de croisements avec d'autres informations publiques, sur l'ensemble des postes manquants.

Les chiffres ainsi complétés permettent d'appliquer aux flux cumulés sur la période 1994-2008 les trois modes de calcul différents du taux de « recyclage » proposés dans la partie précédente. On peut ainsi proposer, en fonction de l'objectif que l'on se donne et de la base de raisonnement qui en découle :

- (A) Un bilan sur l'économie réalisée sur la ressource primaire, c'est-à-dire sur l'uranium naturel. Le calcul porte alors sur le ratio entre les quantités de combustible URE et MOX, qui représentent autant de combustible UOX économisé⁹, et l'ensemble des besoins en combustible. **Le pourcentage d'uranium naturel économisé atteint en cumulé sur 1994-2008 un taux de 7,5 %**, contre 12 % selon le rapport pour 2007-2009 et 17 %, chiffre affiché par EDF, à partir de 2010.
- (B) Un bilan de la « valorisation », autrement dit l'élimination par réutilisation d'une partie de l'inventaire contenu dans les combustibles irradiés. Le calcul porte alors sur le ratio entre les quantités issues de ce combustible effectivement réutilisées, soit l'uranium de retraitement réenrichi entrant dans l'URE et le plutonium entrant dans le MOX, et l'ensemble du combustible déchargé. **Le taux effectif de réutilisation sur la base de 100 % de combustible s'établit en cumulé sur 1994-2008 à 2,0 %**, contre 3,9 % sur 2007-2009 et 7,3 % sur 2010.
- (C) Un bilan de l'exploitation aussi complète que possible de la ressource primaire du « cycle », c'est-à-dire l'uranium naturel. Le calcul porte alors sur le ratio entre l'ensemble des quantités effectivement réutilisées, incluant en plus de celles comptées en (B) l'uranium appauvri entrant dans le MOX, et la quantité initiale d'uranium naturel requise. **Le taux effectif de réutilisation sur la base de 100 % d'uranium naturel entrant dans le « cycle » s'établit en cumulé sur 1994-2008 à 1,2 %**, contre 1,7 % sur 2007-2009 et 2,6 % sur 2010.

7. EDF, *Le cycle du combustible nucléaire d'EDF*, rapport pour la réunion du HCTISN du 20 novembre 2009.

8. C'est en 1985 qu'a été fait le choix, suite au renoncement à construire à court et moyen terme un parc de « surgénérateurs », de développer une stratégie de réutilisation du plutonium séparé sous forme de MOX dans les réacteurs REP existants. Le premier chargement en combustible MOX d'un réacteur français a eu lieu en 1987, et le nombre de réacteurs utilisant ce combustible, tous dans une limite de 30 %, a progressivement été porté à 20 réacteurs en 2000 (puis 22 réacteurs en 2007-2008) sur un total de 28 possibles. L'utilisation de combustible URE a commencé au milieu des années quatre-vingt-dix. Elle n'a concerné jusqu'en 2009 que deux réacteurs de la centrale de Cruas.

9. On ne prend pas ici en compte le fait que 1 t d'URE ou 1 t de MOX ne remplace pas *stricto sensu* 1 t d'UOX, puisque que les taux de combustion atteints ne sont pas les mêmes (au moins pour le MOX, dont les performances sont 20 % moindres).

Tableau 1 – Données et estimations sur les flux du « cycle » du combustible d'EDF sur 15 ans

BILAN EN TONNAGE (tonnes métal lourd, cumul 1994-2008)		Réponse EDF au HCTISN^a	Estimation WISE-Paris^h
Extraction, conversion, enrichissement			
(1)	Uranium naturel	Non fourni	120 000 ⁱ
(2)	Uranium appauvri issu de l'enrichissement	104 600 ^b	= EDF
(3)	Uranium enrichi	Non fourni	15 400 ^j
Fabrication et chargement du combustible			
(4)	Combustible UOX chargé	Non fourni	15 400 ^k
(5)	Combustible URE chargé	Non fourni	250 ^l
(6)	Combustible MOX chargé	Non fourni	1 000 ⁱ
Déchargement et entreposage du combustible			
(7)	Combustible UOX déchargé	Non fourni	15 400
(8)	Combustible URE déchargé	220 ^c	= EDF
(9)	Combustible MOX déchargé	900 ^d	= EDF
Retraitement du combustible			
(10)	Combustible UOX retraité	Non fourni	12 300 ^m
(11)	Combustible URE retraité	Non fourni	0 ^m
(12)	Combustible MOX retraité	Non fourni	< 20 ^m
(13)	Uranium de retraitement séparé	Non fourni	11 730 ⁿ
(14)	Plutonium séparé	Non fourni	115 à 125 ⁿ
Réutilisation des matières			
(15)	Uranium de retraitement enrichi	Non fourni	250 ^o
(16)	Uranium de retraitement appauvri	2 300 ^e	= EDF
(17)	Plutonium utilisé dans la fabrication de MOX	Non fourni	85 ^p
(18)	Uranium appauvri utilisé dans la fabrication de MOX	1 150 ^f	= EDF
(19)	Rebut de fabrication de combustible MOX	Non fourni	150 à 235 ^q
Taux de « recyclage » (%)			
(A)	Économie en uranium naturel = $(5+6) / (4+5+6)$	17 % ^g	7,5 %
(B)	Sur 100 % de matière irradiée = $(15+17-19) / (7+8+9)$	Non calculé	2,0 %
(C)	Sur 100 % de matière première = $(15+17+18-19) / (1)$	Non calculé	1,2 %

a. Les données sont tirées de la réponse d'EDF à une demande du HCTISN pour la réunion du 20 novembre 2009.

b. Soit 2 000 t aux Etats-Unis, 94 000 t en Europe et 8 600 t en Russie.

c. Flux des sites de la centrales de Cruas vers l'usine de La Hague (en décalage de plusieurs années avec les flux déchargés).

d. Flux des sites des réacteurs d'EDF chargés en combustible MOX vers l'usine de La Hague (idem).

e. Soit 450 tonnes en Europe et 1 850 tonnes en Russie.

f. Le document d'EDF indique 1 250 t de 1994 à 2008, dont 100 t en 2009.

g. Ce taux n'est pas relié aux données 1994-2008 mais présenté en généralité au début du document d'EDF.

h. Les estimations de WISE-Paris sont des ordres de grandeur moyens tenant compte des évolutions de l'équilibre de la gestion du « cycle » au fil des ans, sur des facteurs tels que le nombre de réacteurs, les taux de combustion et les taux d'enrichissement en uranium-235 (UOX) ou en plutonium (MOX), le nombre de tranches « moxées », etc. Par ailleurs, les chiffres fournis par EDF sont conservés tels quels sur les postes où ils existent.

i. On considère un besoin moyen d'environ 8 000 t d'uranium naturel par an. Ce tonnage correspond à un ratio moyen entre les flux d'uranium appauvri et d'uranium enrichi de 6,8 t contre 1 t.

j. Le tonnage enrichi est déduit par différence entre l'estimation sur l'uranium naturel et la donnée sur le tonnage appauvri.

k. Le tonnage en UOX est estimé égal au total en uranium enrichi. Avec les estimations sur l'URE et le MOX, l'estimation porte au total sur 16 650 t chargées sur 15 ans, soit une moyenne proche de 1 200 t par an.

l. On prend en compte un décalage de deux ans entre les tonnages rechargés et les tonnages déchargés, ce différentiel de deux ans est estimé pour l'URE à 30 t, et pour le MOX à 100 t.

m. Les tonnages retraités sont déduits des bilans annuels produits par Areva. La moyenne est proche de 825 t par an.

n. Les tonnages d'uranium de retraitement et de plutonium sont estimés à partir des tonnages retraités sur la base d'une teneur moyenne des combustibles usés de 95 % d'uranium et moins de 1 % de plutonium.

o. Le tonnage d'uranium de retraitement enrichi est égal au tonnage d'URE rechargé, et correspond à un ratio proche de 10 t appauvries pour 1 t enrichie cité par ailleurs par EDF.

p. Le tonnage de 85 t correspond à un taux moyen de 7 % en cohérence avec le chiffre d'EDF sur l'uranium appauvri. Ce taux de 7 % est majorant, le taux autorisé dans le MOX n'étant passé de 5,25 % à 7,08 % qu'en 1999.

q. L'estimation sur le volume de rebuts MOX est cohérente avec le différentiel entre le tonnage d'uranium appauvri utilisé pour cette fabrication et l'estimation du tonnage de MOX effectivement chargé. Elle est également cohérente avec les données sur les flux de l'usine MELOX proposés dans les rapports annuels de l'Autorité de sûreté. Compte tenu de l'incertitude, ces quantités, qui devraient en toute rigueur être déduites du total effectivement réutilisé, ne sont pas prises en compte dans les lignes (B) et (C).

Source : d'après données EDF pour le HCTISN, 2010

7. Évolution des flux annuels de 1994 à 2010 et maximum théorique

Les calculs précédents montrent l'augmentation progressive des flux du « retraitement-recyclage », mais soulignent également la limitation forte du potentiel technique de réutilisation des matières dans le parc de réacteurs actuel. Il est dès lors intéressant de comparer l'évolution des flux annuels au gré des modifications intervenues dans la gestion du « cycle » du combustible. Les données examinées et restituées dans le cadre du travail du HCTISN permettent d'établir ces flux annuels moyens sur trois périodes : le réel sur 1994-2008, le réel normalisé par EDF sur 2007-2009, et le prévisionnel d'EDF à partir de 2010. On peut également, sur cette base, imaginer quel serait l'équilibre correspondant au maximum théoriquement atteignable en termes de réutilisation dans les conditions actuelles.

Le **tableau 2** propose une comptabilité résumée des flux annuels correspondant aux différentes périodes couvertes par les données fournies par EDF dans le cadre du travail du HCTISN, ainsi qu'une projection sur le potentiel maximal de réutilisation dans le cadre du « cycle » du combustible actuel. Les résultats illustrent la progression de la réutilisation au cours du temps et témoignent, même si ils ne permettent pas de les détailler, des difficultés techniques et économiques associées à la mise en œuvre de cette réutilisation, qui reste loin d'un maximum théorique par ailleurs lui-même limité.

Les résultats proposés dans le tableau, outre le rappel des calculs précédents sur les taux effectif de réutilisation des matières, incluent un inventaire des différents matériaux sortants de ce flux vers des entreposages, dans lesquels on peut distinguer quatre catégories :

- les matières entreposées sans emploi immédiat et jamais utilisées en réacteur : l'uranium appauvri ;
- les matières entreposées sans emploi immédiat après une première utilisation en réacteur : le combustible UOX usé non retraité, l'uranium de retraitement non réutilisé, l'uranium de retraitement appauvri, le plutonium séparé non réutilisé, les rebuts de fabrication de MOX ;
- les matières entreposées sans emploi après une réutilisation en réacteur : le combustible URE usé, le combustible MOX usé (dans lequel il faudrait en toute rigueur distinguer la part entre le plutonium entrant dans la composition du MOX, qui a effectivement subi un deuxième cycle d'irradiation, et l'uranium appauvri, dont ce n'est en fait que la première utilisation en réacteur) ;
- les matières entreposées officiellement reconnues sans emploi futur : les actinides mineurs et produits de fission (AM + PF) séparés par retraitement et conditionnés en colis de déchets vitrifiés.

Les données pour 1994-2008 incluent la période de montée en charge de la réutilisation de combustible MOX et URE, et rendent compte de certains déséquilibres dans la réalité industrielle de certains flux théoriquement à l'équilibre. Sur cette période, sur 8 000 t environ d'uranium naturel entrant chaque année dans le « cycle » du combustible d'EDF, 7 960 t environ ont été placées en entreposage chaque année, en France ou à l'étranger, dont 6 900 t non utilisées d'uranium appauvri (86,7 %), 983 t de matériaux passés une fois en réacteur (12,3 %), et 79 t issues de la réutilisation (1,0 %).

Les flux normalisés présentés par EDF pour 2007-2009 conduisent, pour 8 100 t d'uranium naturel, à entreposer chaque année 8 063 t de matériaux, dont 6 980 t d'uranium appauvri (86,6 %), 946 t utilisées une fois en réacteur (11,7 %) et 220 t issues de la réutilisation (2,7 %). La gestion visée à partir de 2010 permet de réduire le flux entrant à 7 600 t d'uranium naturel, conduisant à l'entreposage de 7 550 t environ, dont 6 515 t d'uranium appauvri (86,3 %), 915 t de matériaux passés une fois en réacteur (12,1 %) et 120 t issues de la réutilisation (1,9 %). Les données normalisées proposées par EDF avantagent toutefois ce bilan de la réutilisation en ne comptabilisant ni le déséquilibre des flux de plutonium séparé (entre la production par retraitement et la réutilisation par le MOX), ni l'existence de rebuts de fabrication du combustible MOX (qui réduit le bilan de la réutilisation effective du plutonium et de l'uranium appauvri).

Un calcul théorique permet enfin de mesurer le maximum auquel pourrait conduire la stratégie de « retraitement-recyclage » avec le parc de réacteurs actuel. Cette estimation est basée sur le principe d'une réutilisation aussi poussée que possible, du point de vue de l'équilibre des flux, dans un volume total de 1 170 tonnes de combustible pour le parc. Elle ne prend pas en compte d'éventuels rebuts de MOX. Elle ne tient pas compte non plus des aspects liés à la dégradation isotopique des matières qui constituent une limite importante à la mise en œuvre des équilibres en masse. En théorie, la consommation du parc actuel pourrait atteindre 7 250 t d'uranium naturel, avec en sortie 7 210 t dont 6 200 t d'uranium appauvri (85,6 %), 880 t de matière utilisée une fois (12,1 %) et 130 t de matière issue de la réutilisation (1,8 %). **L'économie d'uranium naturel pourrait atteindre 20,5 %. Le taux maximum de réutilisation du combustible atteindrait alors 12,0 %, celui de l'uranium de départ 3,3 %.**

Tableau 2 – Données et estimations^a sur les flux annuels du « cycle » du combustible d'EDF

BILAN EN TONNAGE (tonnes métal lourd, moyenne annuelle)		1994- 2008 ^b	2007- 2009 ^c	≥ 2010 ^d	Max. ^e
Extraction, conversion, enrichissement					
(1)	Uranium naturel	8 000	8 100	7 600	7 250
(2)	Uranium appauvri issu de l'enrichissement	6 975	7 070 ^f	6 625 ^f	6 320 ^l
(3)	Uranium enrichi	1 025	1 033	975	930
Fabrication et chargement du combustible					
(4)	Combustible UOX chargé	1 025	1 033	975	930
(5)	Combustible URE chargé	17	37	75	110
(6)	Combustible MOX chargé	67	100	120	130
Déchargement et entreposage du combustible					
(7)	Combustible UOX déchargé	1 025	1 033	975	930
(8)	Combustible URE déchargé	15	37	75	110
(9)	Combustible MOX déchargé	60	100	120	130
Retraitement du combustible					
(10)	Combustible UOX retraité	820	850	975 ^g	930
(11)	Combustible URE retraité	0	0	75 ^g	110
(12)	Combustible MOX retraité	~0	0	0	0
(13)	Uranium de retraitement séparé	780	800	990	990
(14)	Plutonium séparé	7,7-8,3	8,5	10,5	11,5
Réutilisation des matières					
(15)	Uranium de retraitement enrichi	15-17	37	75	110
(16)	Uranium de retraitement appauvri	155	263 ^h	525 ^h	775
(17)	Plutonium utilisé dans la fabrication de MOX	5,7	8,5 ⁱ	10,5	11,5
(18)	Uranium appauvri utilisé dans la fabrication de MOX	77	91,5	109,5	118,5
(19)	Rebut de fabrication de combustible MOX	10-15,7	0 ^j	0 ^j	0 ^j
Taux de « recyclage » (%)					
(A)	Économie en uranium naturel = (5+6) / (4+5+6)	7,5 %	12 %	17 %	20,5 %
(B)	Sur 100 % de matière irradiée = (15+17-19) / (7+8+9)	2,0 %	3,9 %	7,3 %	11,4 %
(C)	Sur 100 % de matière première = (15+17+18-19) / (1)	1,2 %	1,7 %	2,6 %	3,3 %
Mise en entreposage d'attente					
(I)	Uranium appauvri = (2) - (18)	6 900	6 980	6 515	6 200
(II)	Combustible UOX usé = (7) - (10)	205	183	0	0
(III)	Uranium de retraitement = (13) - (15+16)	608	500	390	105
(IV)	Uranium de retraitement appauvri = (16)	155	263	525	775
(V)	Plutonium séparé = (14) - (17)	2-2,6	0 ^j	0	0
(VI)	Rebut de fabrication de MOX = (19)	10-15,7	0 ^j	0 ^j	0 ^j
(VII)	Combustible URE usé = (8) - (11)	15-17	37	0	0
(VIII)	Combustible MOX usé = (9) - (12)	60-67	100	120	130
(IX)	Actinides mineurs et produits de fission séparés ^k	~ 33	~ 34	~ 42	~ 42

- a. Dans l'ensemble du tableau, pour être distinguées des données directement issues des documents d'EDF et des informations fournies au groupe de travail du HCTISN, les estimations sont signalées en *italique*.
- b. Les données pour 1994-2008 sont obtenues par une moyenne des flux cumulés sur 15 ans.
- c. Les données pour 2007-2009 sont les moyennes pour ces trois années fournies par EDF au groupe de travail du HCTISN.
- d. Les données pour 2010 et les années suivantes sont les flux prévisionnels indiqués par EDF au HCTISN, correspondant à la gestion mise en place par EDF à partir de 2010, notamment dans le cadre du nouveau contrat entre EDF et Areva.
- e. Cette colonne figure une forme de maximum dans la réutilisation des matières dans le cadre de la stratégie de gestion du « cycle » actuelle. Ce maximum repose sur un équilibre des tonnages qui est en réalité beaucoup plus complexe à atteindre dans la gestion industrielle, laquelle doit tenir compte des évolutions de la qualité isotopique des matières.
- f. Les données du rapport indiquent pour 2007-2009 et pour 2010 un flux d'uranium appauvri incohérent de 7 330 t.
- g. On propose ici une répartition des 1 050 t retraitées indiquées par EDF.
- h. Sur 2007-2009, les 37 t d'URE sont obtenues par enrichissement de 300 t d'URT en reprise sur les 800 t séparées. Pour le prévisionnel 2010, les 75 t d'URE sont obtenues par enrichissement de 600 t d'URT en reprise sur les 990 t séparées.
- i. Les données d'EDF sur 2007-2009 indiquent un équilibre des flux de plutonium qui n'est pas vérifié dans les statistiques officielles (déclarations du gouvernement à l'AIEA) sur la gestion du plutonium en France.
- j. Les données d'EDF ne font pas état de l'existence, pourtant corroborée par les statistiques officielles, de rebuts MOX qui absorbent en réalité une partie du plutonium séparé et altèrent le bilan de la réutilisation des matières.
- k. Le tonnage de ces produits conditionnés en colis de déchets vitrifiés est estimé sur la base du tonnage retraité.
- l. On applique pour ce bilan théorique le même ratio uranium enrichi/uranium appauvri que celui indiqué par EDF à partir de 2010.

Source : d'après données EDF pour le HCTISN, 2010

8. Principes d'une comptabilité de l'utilisation et de la réutilisation de matières

L'analyse développée dans les parties précédentes apporte une première évaluation des flux permettant de mesurer l'importance, dans la gestion par EDF du « cycle » du combustible dans ses réacteurs, de l'utilisation et de la réutilisation des matières. L'inventaire des matières placées en entreposage d'attente est une première étape qui permet de proposer une comptabilité plus rigoureuse de cet aspect de la gestion, basée sur deux principes.

Le premier principe consiste, de façon simple, à ne mesurer que les flux entrant et sortant du « cycle », à l'exclusion des flux intermédiaires. La comptabilité proposée prend ainsi en compte d'un côté, le flux d'uranium naturel qui entre dans le « cycle » chaque année, et de l'autre, les différents matériaux qui en sortent, au sens où ils sont produits à une étape du « cycle » sans être utilisés à la suivante. Ces flux sortants constituent donc en réalité le solde pour l'année considérée entre ce qui est produit à une étape et ce qui est absorbé à l'étape suivante. Par exemple, si 1 000 t de combustible UOX sont déchargées des réacteurs dans l'année, et 800 t retraitées, le solde ou flux sortant pour l'année est de 200 t placées en entreposage d'attente. L'essentiel de la quantité de matière issue de l'uranium naturel se conservant au cours des opérations successives, la somme des flux sortants ainsi identifiés est approximativement égale au flux entrant d'uranium naturel.

La réalité est plus complexe, du fait des délais qui interviennent entre chaque étape, et notamment des délais techniques liés au refroidissement des matières irradiées : les modifications dans les équilibres des flux, liées à une évolution du nombre de réacteurs ou à une évolution des paramètres de gestion du « cycle », peuvent donc mettre plusieurs années à se répercuter dans l'ensemble de la chaîne. Ainsi, cette comptabilité simple s'applique aux flux annuels en période stable, ou aux flux cumulés sur une période longue pour intégrer l'effet de modifications. Elle ne permet pas de représenter le détail d'une année de transition.

Le deuxième principe consiste à séparer aussi finement que possible, dans les flux sortants, les masses de matières en fonction de leur degré d'utilisation. On désigne ici par « utilisation », en lien avec la finalité première du « cycle » du combustible, le passage en réacteur. On distingue ainsi des matières « non utilisées », qui ne sont pas passées en réacteur, des matières « utilisées » qui y sont passées une fois, et des matières « réutilisées » qui y passent une deuxième fois. On peut identifier ces matières à chaque étape du « cycle ».

Dans la gestion passée d'EDF, les matières constituant les flux sortants, comme indiqué dans le **tableau 3**, sont :

- l'**enrichissement** de l'uranium naturel produit un flux d'uranium appauvri (I) qui, en dehors d'une partie entrant dans la fabrication du MOX, constitue un stock de matière non utilisée (on ne prend pas ici en compte de flux d'uranium enrichi, supposé intégralement absorbé dans la fabrication du combustible UOX, de même, on suppose que tout le combustible fabriqué est utilisé) ;
- l'**irradiation en réacteur** du combustible produit du combustible irradié dont une partie est entreposée sans être retraitée. Ceci concerne une partie du combustible UOX usé (II), qui constitue donc une matière utilisée une fois, puis le combustible URE usé (VII), qui constitue donc une matière réutilisée. Le cas du combustible MOX, qui n'est pas retraité, est particulier : le MOX neuf étant constitué en partie d'uranium appauvri non utilisé et de plutonium utilisé une fois, le MOX usé contient des matières issues de l'uranium appauvri (VIII.a) qui ont été utilisées une fois, et des matières issues du plutonium (VIII.b) qui ont été réutilisées ;
- le **retraitement** du combustible UOX usé produit du plutonium, de l'uranium de retraitement (URT) et des produits de fission et actinides mineurs (PF + AM). Une partie de l'URT (III) et du plutonium (V) ne sont pas réutilisés et constituent donc un entreposage de matières utilisées une fois. Les PF + AM (IX), conditionnés en colis de déchets vitrifiés, sont les seules matières officiellement reconnues sans perspective de nouvelle utilisation. Ils constituent un flux sortant de matières utilisées une fois ;
- la **préparation à la réutilisation** de matières issues du retraitement génère deux flux sortants supplémentaires. Le premier concerne la réutilisation de l'URT, dont le réenrichissement crée un flux d'URT appauvri (IV) (en supposant, comme pour l'uranium naturel, que tout l'URT enrichi est absorbé dans l'URE). Le second concerne les rebuts de fabrication de MOX, liés à la réutilisation du plutonium, dans lequel il faut distinguer la part constituée d'uranium appauvri (VI.a), qui n'a donc jamais été utilisée, et la part liée au plutonium, qui a été utilisée une fois.

La gestion prévisionnelle présentée par EDF dans le cadre du rapport du HCTISN comme devant être mise en œuvre à partir de 2010 introduit un niveau de complexité supplémentaire. Celle-ci prévoit en effet le retraitement d'une partie du combustible URE usé et la réutilisation du plutonium qui en est issu.

Comme indiqué dans le **tableau 4**, les modifications à introduire dans la comptabilité des matières sortantes sont :

- l'introduction de flux sortants associés aux matières issues du retraitement du combustible URE. Il faut ainsi inclure parallèlement au flux d'URT issu d'UOX (III.a), un flux d'uranium de retraitement issu d'URE (III.b), parallèlement au flux de plutonium séparé issu d'UOX (V.a), un flux de plutonium séparé issu d'URE (V.b),

et enfin parallèlement au flux de PF + AM issus d'UOX (IX.a), un flux de PF + AM issus d'URE (IX.b). Ces flux sortants issus du retraitement d'URE usé sont des matières déjà réutilisées ;

- l'introduction ponctuelle d'un multi-réutilisation, avec l'incorporation dans le combustible MOX neuf d'une fraction de plutonium issu du retraitement de l'URE. L'irradiation de ce combustible MOX constitue donc le troisième passage en réacteur de la fraction correspondante. Il faut dès lors identifier une fraction multi-réutilisée, correspondant à la part du plutonium issu d'URE dans le combustible MOX usé (VIII.c). Par ailleurs, dans le flux sortant de rebuts de fabrication du MOX, il faut distinguer au sein du contenu en plutonium de ces rebuts la part issue du retraitement de l'UOX (VI.b), utilisée une fois, et la part issue du retraitement du MOX (VI.c), utilisée deux fois.

Tableau 3 – Matières présentes dans les flux sortants dans la gestion passée d'EDF

	Enrichissement	Irradiation en réacteur	Retraitement	Préparation à la réutilisation
Matières non utilisées	(I) Uranium appauvri			(VI.a) Part « U app » des rebuts MOX ^a
Matières utilisées une fois en réacteur		(II) UOX usé (VIII.a) Part « U app » du MOX usé	(III) URT (V) Plutonium séparé ^a (IX) PF +AM ^b	(IV) URT appauvri (VI.b) Part « Pu » des rebuts MOX ^a
Matières réutilisées en réacteur		(VII) URE usé (VIII.b) Part « Pu » du MOX usé		

- a. On intègre ici des flux sortants (mise en entreposage sans réutilisation à court terme) de plutonium séparé issu du retraitement de combustible UOX d'une part, et de rebuts de fabrication du MOX d'autre part. D'autres informations publiques attestent qu'ils existent mais ils n'apparaissent pas dans les données fournies par EDF au HCTISN.
- b. Les produits de fission et actinides mineurs issus du retraitement sont les seuls matériaux officiellement reconnus sans emploi et donc classés aujourd'hui comme déchets.

Tableau 4 – Matières présentes dans les flux sortants dans la gestion prévisionnelle d'EDF

	Enrichissement	Irradiation en réacteur	Retraitement	Préparation à la réutilisation
Matières non utilisées	(I) Uranium appauvri			(VI.a) Part « U app » des rebuts MOX ^a
Matières utilisées une fois en réacteur		(II) UOX usé ^b (VIII.a) Part « U app » du MOX usé	<i>Issus de l'UOX :</i> (III.a) URT (V.a) Plutonium séparé ^a (IX.a) PF +AM ^c	(IV) URT appauvri (VI.b) Part « Pu-UOX » des rebuts MOX ^a
Matières réutilisées en réacteur		(VII) URE usé ^b (VIII.b) Part « Pu-UOX » du MOX usé	<i>Issus de l'URE :</i> (III.b) URT (V.b) Plutonium séparé ^a (IX.b) PF +AM ^c	(VI.c) Part « Pu-URE » des rebuts MOX ^a
Matières multi-réutilisées		(VIII.c) Part « Pu-URE » du MOX usé		

- a. On intègre ici des flux sortants (mise en entreposage sans réutilisation à court terme) de plutonium séparé issu du retraitement de combustible UOX ou URE d'une part, et de rebuts MOX d'autre part. On signale ainsi que ces pertes sont probables au regard de l'expérience passée, bien qu'elles n'apparaissent pas dans les prévisions fournies par EDF au HCTISN.
- b. De même, on intègre des flux sortants de combustible usé UOX et URE non retraités à court terme, pour signaler qu'il est possible que leur accumulation se poursuive même si ceux-ci n'apparaissent pas dans les prévisions fournies par EDF.
- c. Les produits de fission et actinides mineurs issus du retraitement sont les seuls matériaux officiellement reconnus sans emploi et donc classés aujourd'hui comme déchets.

Il convient de noter que, même si une fraction de matière connaît une deuxième réutilisation dans la gestion ainsi proposée, celle-ci reste très marginale et ne constitue pas un véritable « multi-recyclage ». Celui-ci nécessiterait, pour être mis en œuvre sur l'uranium, la réutilisation de l'uranium de retraitement issu du combustible URE, qui n'est pas envisagée dans la projection d'EDF. Pour le plutonium, il s'agirait de récupérer le plutonium issu du retraitement de combustible MOX. Le retraitement de ce combustible est renvoyé à la gestion d'un futur parc de réacteurs capables d'absorber ce plutonium. L'intégration dans le « cycle » des réacteurs actuels de cette multi-réutilisation des matières, au-delà des équilibres complexes en masse, se heurte à d'importants obstacles techniques et économiques liés à la dégradation isotopique des matières après chaque irradiation.

9. Application à la comptabilité des flux annuels passés et prévisionnel

Les principes proposés peuvent être appliqués aux bilans établis précédemment pour différents régimes de gestion du « cycle » sur le parc nucléaire actuels. Ils permettent, en séparant au sein des matériaux composant les flux sortants la part de matière correspondant à chaque nombre d'utilisation(s), de préciser la comptabilité de l'utilisation et de la réutilisation.

Le **tableau 5** présente les résultats correspondants pour les quatre régimes étudiés précédemment : la gestion de 1994 à 2008, la présentation normalisée par EDF de la gestion récente (2007-2009), la gestion prévisionnel d'EDF à partir de 2010, et un maximum théorique de réutilisation à l'équilibre des flux hors « multi-recyclage ». Ainsi, le tableau établit, en regard du flux entrant d'uranium (E), le total dans les flux sortants de matières non utilisées (S0), de matières utilisées une fois (S1), de matières utilisées deux fois (S2) et le cas échéant de matières utilisées une troisième fois (S3).

Le tableau propose dès lors deux types d'indicateurs :

- des **taux d'utilisation et de réutilisation**, en calculant pour chaque niveau d'utilisation, la part de matières dans les flux sortants ayant atteint au moins ce niveau par rapport à la part ayant atteint le niveau précédent. La fraction (Fn) représente ainsi la part, parmi les matières utilisées n-1 fois, des matières utilisées n fois ;
- la **répartition des matières selon leur degré d'utilisation**, en calculant pour chaque niveau d'utilisation n la part (Pn) des matières correspondantes dans le total des flux sortants.

Tableau 5 – Comptabilité des flux annuels sortants dans différents régimes de gestion du combustible^a

BILAN EN TONNAGE (tonnes métal lourd, flux annuel)		1994- 2008	2007- 2009	≥ 2010	Max.
Matière entrante (matière première)					
(E)	Uranium naturel consommé	~ 8 000	~ 8 100	~ 7 600	~ 7 250
Matières sortantes (mise en entreposage d'attente)					
	(I) Uranium appauvri	6 900	6 980	6 515	6 200
	(VI.a) Part « uranium appauvri » des rebuts MOX	11,5	0	0	0
(S0)	Total des matières non utilisées	6 912	6 980	6 515	6 200
	(II) Combustible UOX usé	205	183	0	0
	(III.a) URT issu du retraitement d'UOX	608	500	319	0
	(IV) Uranium de retraitement appauvri	155	263	525	775
	(V.a) Plutonium séparé issu du retraitement d'UOX	2	0	0	0
	(VI.b) Part « plutonium UOX » des rebuts MOX	1	0	0	0
	(VIII.a) Part « uranium appauvri » du MOX usé	57	92	110	118
	(IX.a) PF + AM issus du retraitement de l'UOX	33	34	39	37,5
(S1)	Total des matières utilisées une fois	1 061	1 072	993	930
	(VII.a) Combustible URE usé	16	37	0	0
	(VIII.b) Part « plutonium UOX » du MOX usé	4,5	8	9,3	10,7
	(III.b) URT issu du retraitement de l'URE	—	—	71	105
	(V.b) Plutonium séparé issu du retraitement d'URE	—	—	0	0
	(VI.c) Part « plutonium URE » des rebuts MOX	—	—	0	0
	(IX.b) PF + AM issus du retraitement de l'URE	—	—	3	4,5
(S2)	Total des matières utilisées deux fois	21	45	83	121
	(VIII.c) Part « plutonium URE » du MOX usé	—	—	0,7	1,3
(S3)	Total des matières utilisées trois fois	—	—	0,7	1,3
Total des flux sortants = (S0+S1+S2+S3)		7 994	8 097	7 592	7 252
Taux d'utilisation et de réutilisation					
(F1)	Fraction utilisée = (S1+S2+S3) / (S0+S1+S2+S3)	13,53 %	13,80 %	14,19 %	14,51 %
(F2)	Fraction réutilisée = (S2+S3) / (S1+S2+S3)	1,90 %	4,03 %	7,80 %	11,55 %
(F3)	Fraction multi-utilisée = (S3) / (S2+S3)	—	—	0,83 %	1,07 %
Répartition selon le degré d'utilisation					
(P0)	Part non utilisée = (S0) / (S0+S1+S2+S3)	86,47 %	86,20 %	85,81 %	85,49 %
(P1)	Part utilisée une fois = (S1) / (S0+S1+S2+S3)	13,27 %	13,24 %	13,08 %	12,83 %
(P2)	Part utilisée deux fois = (S2) / (S0+S1+S2+S3)	0,26 %	0,56 %	1,10 %	1,66 %
(P3)	Part utilisée trois fois = (S3) / (S0+S1+S2+S3)	—	—	0,01%	0,02%
Total		100 %	100 %	100 %	100 %

a. Pour le détail des hypothèses et flux associés, se reporter au **tableau 2**.

Cette analyse permet d'établir plus finement que précédemment le bilan de la réutilisation. Tout d'abord, la majorité de la matière reste non utilisée : le taux d'utilisation de l'uranium naturel aurait ainsi progressé de 13,5 % dans les années 1994-2008 pour atteindre 14,2 % dans la gestion mise en œuvre à partir de 2010, avec un maximum estimé dans les mêmes conditions à 14,5 %. Ensuite, le taux de réutilisation des matières utilisées une fois reste très limité : ce taux qui n'atteignait que 1,9 % sur 1994-2008 a progressé pour atteindre 4,0 % ; la gestion prévue à partir de 2010 par EDF pourrait le porter jusqu'à 7,8 % et le maximum théorique, dans les conditions actuelles, se situe autour de 11,5 %. Dans cette gestion, une faible proportion, soit 1 % environ des matières réutilisées est utilisée une troisième fois.

Les figures suivantes indiquent la répartition en masse des flux sortants selon le nombre d'utilisations pour l'ensemble des matières (figure 3) et pour l'ensemble des matières utilisées au moins une fois (figure 4). On observe en particulier que le gain relatif sur les quantités réutilisées s'accompagne de profondes modifications dans l'inventaire des matières issues de la première comme de la deuxième utilisation.

Figure 3 – Répartition des flux sortants annuels de matières selon leur degré d'utilisation

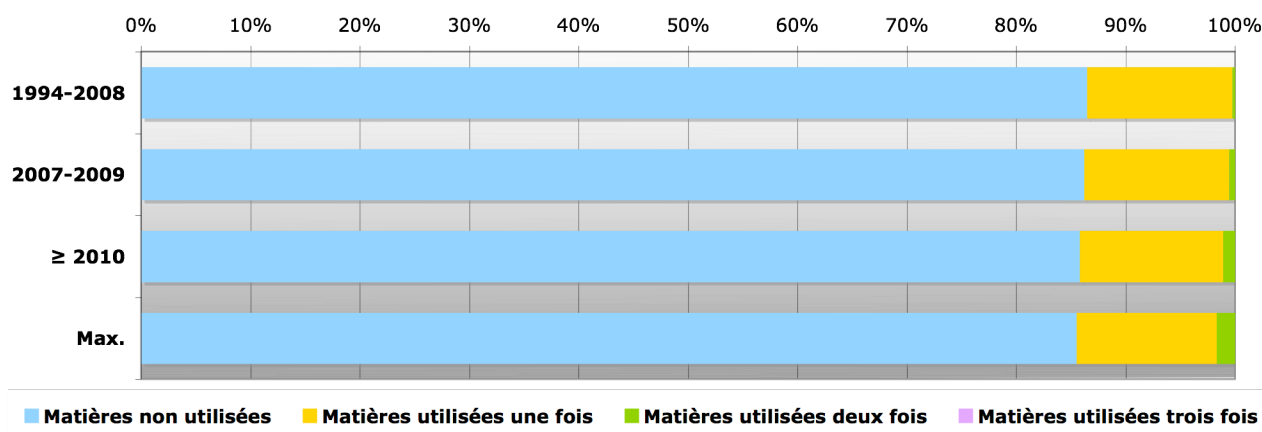
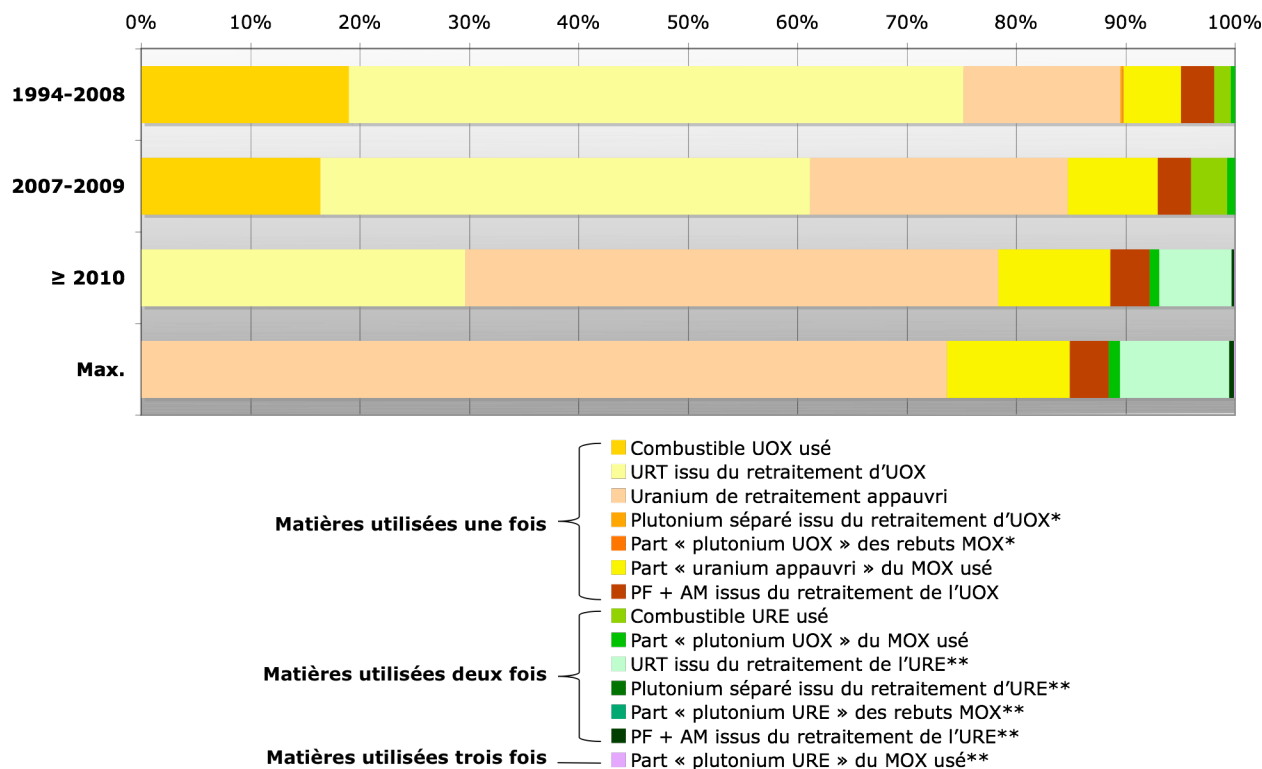


Figure 4 – Inventaire des flux sortants annuels de matières utilisées une fois ou davantage^a



a. La composition des matières sortantes varie selon le mode de gestion concerné. Certains flux sortants constatés dans le passé et jusqu'à 2008 ne sont pas repris dans les données d'EDF pour les années récentes et à partir de 2010 (plutonium séparé non réutilisé et rebuts MOX, marqués d'un *). D'autres flux liés au retraitement de combustible URE n'existent que dans la gestion prévue pour EDF à partir de 2010 (flux marqués d'un **).