

# Incidences de la production et de l'utilisation de l'énergie d'origine nucléaire sur l'environnement: résumé de l'étude du Programme des Nations Unies pour l'environnement

---

par J.U. Ahmed et H.T. Daw

## HISTORIQUE

Lors de sa quatrième session, qui s'est tenue en 1976, le Conseil d'administration du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) a prié le Directeur exécutif du PNUE d'entreprendre une étude comparative des différentes formes de production d'énergie. Le PNUE a donc commencé cette étude en organisant à Varsovie, en 1978, une table ronde sur les combustibles fossiles. Deux réunions de travail sur l'énergie nucléaire ont eu lieu, l'une à Genève en novembre 1978 et l'autre à Nairobi en avril 1979. La réunion consacrée aux sources énergétiques renouvelables s'est tenue en janvier 1980 à Bangkok. Deux tables rondes sur l'évaluation comparative sont prévues en 1980; la première, qui sera restreinte, portera sur le choix de la méthode de comparaison à adopter et la seconde, qui sera élargie, sur les évaluations comparatives proprement dites. L'AIEA a participé à l'ensemble des tables rondes organisées à ce jour et elle a pris une part active à l'élaboration du rapport consacré aux incidences de l'énergie d'origine nucléaire sur l'environnement [ 1]. L'Agence entend également être présente aux deux tables rondes sur les évaluations comparatives.

En règle générale, l'industrie nucléaire a sur l'environnement des effets analogues à ceux de l'industrie des combustibles fossiles. Cependant, l'industrie nucléaire soulève un problème spécifique, celui des rejets de matières radioactives et de leurs répercussions sur la biosphère, en particulier sur l'organisme humain. C'est pourquoi l'étude du PNUE porte essentiellement sur les incidences négatives de la production d'énergie d'origine nucléaire sur la santé.

## INCIDENCES SUR L'ENVIRONNEMENT

Le document élaboré par le PNUE étudie les incidences de l'énergie d'origine nucléaire sur l'environnement en passant en revue les diverses opérations qu'implique l'industrie de l'énergie nucléaire. Il s'agit notamment de l'extraction et du traitement de l'uranium ainsi que de son enrichissement, de la fabrication d'éléments combustibles, de l'exploitation des réacteurs, du retraitement des combustibles irradiés (en cas de recyclage), de la gestion des déchets radioactifs produits à toutes les phases du cycle du combustible nucléaire, du déclassement des installations et du transport des matières radioactives. Les répercussions de ces diverses opérations sur l'environnement sont définies à partir de critères normalisés établis sur la base d'une production nette d'un gigawatt par an (GW/a).

---

J.U. Ahmed et H.T. Daw font partie de la Division de la sûreté nucléaire et de la protection de l'environnement de l'AIEA.

## **Extraction du minerai d'uranium**

Les effets radiobiologiques de l'extraction de l'uranium sont le résultat d'une exposition au radon et aux produits de filiation de cet élément qui se dégagent du minerai d'uranium. L'inhalation du radon et de ses produits de filiation provoque l'irradiation par particules alpha des tissus du poumon et des voies respiratoires, ce qui a pour effet d'accroître les possibilités de contracter un cancer du poumon. Dans certaines mines, l'ensemble du corps peut lui aussi se trouver exposé à un rayonnement gamma de forte intensité.

## **Traitement du minerai d'uranium**

Au stade du traitement, le minerai est soumis à des opérations mécaniques et chimiques qui ont pour but d'extraire l'uranium qu'il contient et d'obtenir un concentré d'oxydes d'uranium appelé «concentré orange». Les répercussions radiologiques qu'entraîne ce traitement résultent du rejet de poussières contenant de l'uranium et des produits de filiation de cet élément, en l'occurrence du thorium 226 et du thorium 230 ainsi que du radon et des produits de filiation du radon, etc. Le radon s'échappe par les événements des cuves de lixiviation, mais il provient également des tas de minerai, du dispositif de rétention des résidus ainsi que du système de ventilation du matériel de concassage et de broyage. Le radium contenu dans le minerai est en grande partie insoluble et reste enfermé dans les résidus solides; seule une très faible proportion, environ 1% tout au plus, finit par se dissoudre. Ces déchets dissous contiennent du radium 226, du thorium 230, de l'uranium ainsi que de faibles concentrations de produits de la décroissance du radon.

## **Production d'hexafluorure d'uranium**

Avant de pouvoir alimenter une installation d'enrichissement, le concentré d'oxydes d'uranium ( $U_3O_8$ ) issu du traitement doit être purifié et transformé en un élément volatil, l'hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ). A ce stade, la radioactivité résulte du rejet de radio-nucléides dans l'environnement, qu'il s'agisse de l'atmosphère ou des eaux.

## **Enrichissement de l'uranium**

L'alimentation des réacteurs à eau légère (LWR) et des réacteurs perfectionnés refroidis au gaz passe nécessairement par l'enrichissement de l'uranium, opération qui consiste à augmenter la concentration en uranium 235. La concentration de cet isotope dans l'uranium naturel est de l'ordre de 0,7%, alors que le combustible utilisé à l'heure actuelle dans les réacteurs à eau légère contient de 2 à 4% d'uranium enrichi. Les technologies d'enrichissement utilisées à une grande échelle font appel à la diffusion gazeuse ou à la centrifugation des isotopes de l'uranium sous la forme d' $UF_6$ .

A cette étape, c'est le rejet des isotopes de l'uranium dans l'environnement qui a des répercussions radiologiques. On notera à cet égard que l'étude du PNUE attribue l'augmentation des risques professionnels à l'utilisation de grandes quantités d'électricité qu'implique l'enrichissement par diffusion gazeuse. Si l'on postule que les deux tiers de l'électricité utilisée sont fournis par des centrales à charbon, le recours à l'électricité pour assurer cette diffusion se traduira par une augmentation des décès de 0,01 à 0,1 par GW/a, étant donné que les risques que présente l'exploitation des centrales à charbon sont beaucoup plus élevés que ceux qu'entraînent les centrales nucléaires. Ces risques diminuent dans les installations de séparation isotopique par centrifugation gazeuse qui n'utilisent qu'environ 10% de l'électricité absorbée par les installations de diffusion.

## **Fabrication du combustible**

Dans une usine de fabrication de combustible nucléaire, l' $UF_6$  enrichi est converti en une poudre de bioxyde d'uranium ( $UO_2$ ), laquelle est ensuite transformée en pastilles et

soumise à un frittage de façon à obtenir un solide de la densité souhaitée. Les pastilles ainsi traitées sont empilées dans des tubes en alliage de zirconium dont les extrémités sont soudées de manière à former des aiguilles de combustible scellées. Enfin, les aiguilles sont réunies en ensembles fixes que l'on appelle éléments combustibles. Ces diverses opérations peuvent entraîner un rejet d'isotopes de l'uranium et du thorium 234.

### Exploitation des centrales nucléaires

En cours d'exploitation, des radionucléides sont formés par la fission du combustible nucléaire et par l'activation neutronique des matériaux de structure, des produits de la corrosion et des impuretés présentes dans l'eau de refroidissement du réacteur. La plupart des produits de fission demeurent dans les éléments combustibles, mais un gainage défectueux de ces éléments peut entraîner le passage d'une partie d'entre eux dans le liquide de refroidissement. La plupart des isotopes radioactifs rejetés dans le calorporteur ou dans le modérateur sont extraits par des procédés utilisant l'eau sous forme gazeuse ou liquide, mais il peut arriver qu'une partie des substances radioactives soit libérée dans l'environnement.

Parmi les nombreux produits radioactifs issus de la fission ou de l'activation durant le fonctionnement d'un réacteur, l'étude du PNUE met essentiellement l'accent sur le tritium, le carbone 14 et les radionucléides présents sous forme de particules qui, rejetées dans l'atmosphère ou dans les eaux, ont des incidences sur l'environnement. L'étude traite en particulier du tritium et du krypton 85, ces deux radionucléides ayant une période longue et étant universellement répandus. Le krypton 85, notamment, présente un intérêt particulier dans la mesure où il est difficile à contrôler et du fait de son comportement non réactif et mobile dans l'environnement. Dans le cas du carbone 14, qui a également une longue période, les risques de radioexposition résultant de son accumulation dans l'environnement sont infiniment plus élevés que les risques occasionnés par la présence de gaz rares ou de tritium. Plusieurs radionucléides, et notamment l'iode 131, ont des incidences à l'échelon local. Quant à l'iode 129, il peut aussi avoir des répercussions sur le plan mondial. Les gaz rares, le tritium sous forme de vapeur d'eau tritiée, le carbone 14 et l'iode pénètrent dans l'environnement sous forme d'effluents en suspension dans l'air. Des aérosols contenant des produits de fission et d'activation ainsi que des produits de filiation des gaz rares peuvent également se manifester sous cette forme dans le milieu.

Les dommages qu'entraîne pour l'organisme humain la production d'énergie d'origine nucléaire sont essentiellement le fait de l'exposition professionnelle aux rayons gamma des produits de fission et d'activation. L'irradiation des populations est le résultat du rejet de radionucléides dans l'environnement. Les radionucléides issus d'un réacteur nucléaire et rejetés sous forme d'effluents liquides ou en suspension dans l'air subissent toute une série de transformations physiques, chimiques et biologiques complexes avant d'atteindre l'organisme humain. La nature de ces phénomènes est fonction de l'implantation du réacteur, des conditions météorologiques et des différentes voies de contamination.

Les radionucléides rejetés sous forme d'effluents liquides peuvent atteindre l'organisme des individus ayant absorbé de l'eau ou consommé du poisson (pour ce qui est de l'eau douce), ou ayant mangé des poissons de mer ou des crustacés (pour ce qui est des effluents déversés dans la mer). Sur le littoral, une partie de la population peut également se trouver soumise à une irradiation externe due à des sédiments radioactifs.

### Retraitement

Les éléments combustibles irradiés des réacteurs à eau légère contiennent de l'uranium non brûlé, du plutonium, certains actinides plus lourds et des produits de fission extrêmement radioactifs. L'uranium et le plutonium contenus dans ces éléments irradiés constituent de

précieuses sources d'énergie et peuvent être réutilisés une fois séparés des produits de fission. Il est possible d'enrichir à nouveau l'uranium et d'en faire des éléments combustibles frais ou encore de s'en servir comme base d'un combustible sous forme de «mélange d'oxydes» dans lequel on incorpore une quantité appropriée de plutonium isolé.

Trois options sont offertes dans le cas des réacteurs à eau légère, à savoir: sans recyclage, avec recyclage de l'uranium uniquement et avec recyclage de l'uranium et du plutonium. Toutes les trois soulèvent un certain nombre de problèmes techniques et économiques ainsi que des problèmes de santé, de sûreté et de protection de l'environnement, qui appellent autant de solutions différentes. Le recyclage du plutonium et de l'uranium entraîne des mouvements de plutonium purifié qui exigeront un surcroît de garanties par rapport à celles qui sont déjà en vigueur. Enfin, le plutonium recyclé joue un rôle essentiel dans le développement des réacteurs surrégénérateurs.

Dans leur presque totalité, les gaz radioactifs issus de la fission et contenus dans les éléments combustibles irradiés des réacteurs à eau légère sont piégés physiquement ou chimiquement par le gainage de zirconium, la matrice du combustible proprement dite et le réservoir du gaz de fission situé à l'extrémité de chaque aiguille de combustible. Ces gaz se libèrent dès les phases initiales du retraitement, en règle générale au cours du tronçonnage des éléments de combustible ou de la dissolution du combustible. Les effluents gazeux contiennent du krypton 85 et de l'iode 129, ainsi qu'une certaine quantité de tritium et de carbone 14. Diverses méthodes permettant d'extraire chacun de ces éléments des gaz rejetés ont été mises au point.

Pour pouvoir évaluer les incidences du retraitement sur l'environnement, on s'est servi de l'exemple de l'usine THORP (usine thermique de retraitement des combustibles à oxydes) qui doit être construite à Windscale (Royaume-Uni). L'usine THORP a été conçue pour pouvoir traiter un maximum de 1 200 tonnes d'uranium irradié par an (soit l'équivalent d'environ 40 GW/an). Le tableau 1 donne une prévision des risques que l'exploitation de l'usine THORP pourrait faire courir à la population mondiale.

**Tableau 1. Prévision des risques que l'exploitation de l'usine THORP pourrait faire courir à la population du monde**

Groupe visé	Nature des répercussions	Risque* (par année d'exploitation)	Observations
Population mondiale (y compris le personnel de l'usine THORP)	Décès dus au cancer par suite d'irradiation	2 (pour l'ensemble de la population mondiale)	On estime à 8 millions le nombre des décès dus à un cancer spontané (quelle qu'en soit la cause)
Population mondiale (y compris le personnel de l'usine THORP)	Graves anomalies génétiques	1 (pour l'ensemble de la population mondiale)	S'applique à la totalité des générations à venir

\* Risque établi sur la base de la dose d'irradiation totale, au cours d'une période de 100 ans, et résultant d'une année d'exploitation à la puissance prévue (1200 tonnes par an, soit l'équivalent de 40 GWa).

## **Gestion des déchets radioactifs**

Pratiquement tous les secteurs de l'industrie nucléaire produisent des déchets radioactifs qui s'accumulent sous forme de liquides, de solides ou de gaz dont l'activité est variable. La majeure partie de ces déchets est produite au début du cycle du combustible nucléaire, c'est-à-dire au niveau de l'extraction et du traitement de l'uranium, mais c'est en fin de cycle, au niveau de l'exploitation du réacteur et du retraitement du combustible (en cas de recyclage) que l'activité des déchets produits est la plus élevée. En cas de non-recyclage ou de recyclage de l'uranium seul, le plutonium n'est pas récupéré, et on le considère donc comme un déchet transurannique.

On a établi pour les déchets radioactifs la classification suivante: déchets à faible activité, à activité intermédiaire, à forte activité et déchets contaminés par transuranniens. Il existe plusieurs manières de traiter ces déchets: a) évacuation immédiate au fur et à mesure de leur formation, dans le cas des déchets gazeux et solides à faible activité; b) conditionnement et stockage avant évacuation, méthode appliquée aux déchets d'activité intermédiaire pouvant justifier de telles précautions; c) conditionnement et stockage prolongé avant évacuation, méthode qui s'applique aux déchets à forte activité et aux déchets transuranniens. Des techniques d'évacuation sûres et acceptables ont d'ores et déjà été mises au point pour les deux premières catégories de déchets. La gestion des déchets solides contaminés par transuranniens s'effectue en plusieurs étapes: il convient en effet de leur faire subir diverses opérations de traitement avant de les acheminer sur les lieux de dépôt ou de stockage. En règle générale, les déchets solidifiés à forte activité sont stockés provisoirement avant d'être acheminés vers leur lieu de destination finale.

Les chercheurs étudient actuellement plusieurs solutions de remplacement qui permettraient, à l'avenir, d'éliminer les déchets radioactifs en les enfouissant notamment dans les fonds marins, sous la calotte glaciaire et dans les couches géologiques profondes des continents. Pour chacune de ces solutions, plusieurs hypothèses ont été avancées, mais il faut souligner que la méthode à adopter dépend nécessairement du choix du site, de la forme des déchets et de la technique d'élimination choisie. Parmi les procédés envisagés, on considère que l'enfouissement en profondeur dans des couches géologiques continentales constitue une solution d'avenir.

## **Déclassement des installations**

On peut définir le déclassement d'une installation nucléaire comme la série des mesures prises au terme de la durée de vie de l'installation en question en vue d'assurer la protection permanente du public contre les effets de la radioactivité résiduelle et contre tout autre risque que pourrait présenter l'installation une fois désaffectée. D'une manière générale, on a essentiellement recours à deux grandes méthodes, dont l'une consiste à procéder au démantèlement immédiat de l'installation et l'autre à stocker en toute sûreté les produits radioactifs en ajournant — ou non — le démantèlement de l'installation. Les méthodes suivies pour le déclassement vont de l'élimination sommaire et de la fixation de la radioactivité résiduelle (mesures complétées par l'entretien et la surveillance des installations) jusqu'au nettoyage en profondeur, à la décontamination et à l'enfouissement. Toutes ces méthodes de stockage en sûreté appellent des mesures de surveillance et des précautions qu'il convient de maintenir durant toute la période d'immobilisation, laquelle peut aller de quelques années à plusieurs décennies.

## **Transport des matières radioactives**

A cet égard, il convient de souligner que le transport des matières radioactives est insignifiant, comparé aux moyens énormes mobilisés par les centrales à charbon et qui sont en grande

partie responsables de l'impact de celles-ci sur l'environnement. C'est uniquement en raison de la nature radioactive de ces matières que leur transport suscite l'inquiétude du public. Il faut dire que le volume des matières radioactives transportées a augmenté et qu'il continuera d'augmenter avec le développement de l'industrie de l'énergie nucléaire. En règle générale, le transport des matières radioactives provenant du cycle du combustible nucléaire s'effectue par la route et, dans une moindre mesure, par chemin de fer ou par voie maritime.

## RESUME

On trouvera ci-après (tableau 2) un résumé des statistiques relatives à la mortalité due à des cancers d'origine nucléaire (par gigawatt-an) parmi le personnel et dans le public. L'option retenue est celle du non-recyclage.

**Tableau 2. Taux de mortalité par cancer résultant du cycle du combustible dans les réacteurs à eau légère (sans recyclage) parmi le personnel des centrales et dans le public (GWa)**

Phase du cycle du combustible	Personnel	Public
	Taux de mortalité par cancer	Taux de mortalité par cancer
Extraction	0,03–0,1	0,02–0,04
Traitement	0,036	0,005–0,04
Conversion d'UF <sub>6</sub>	0,0004	0,001
Enrichissement	0,0005	négligeable
Fabrication de combustible UO <sub>2</sub>	0,01	négligeable
Production d'énergie (LWR)	0,13	0,06
Déclassement (immédiat)	0,004	négligeable
Gestion des déchets (y compris stockage du combustible irradié)	4 X 10 <sup>-5</sup>	négligeable
Transport	4 X 10 <sup>-5</sup>	1 X 10 <sup>-5</sup>
Total	0,28	0,14

Comme le montre le tableau 3, le préjudice imputable aux activités de l'industrie nucléaire ne constitue qu'une faible proportion des dommages que subit la population mondiale du fait de son exposition au rayonnement naturel et à d'autres sources d'irradiation.

**Tableau 3. Engagement de dose à l'échelle du monde des différentes sources d'irradiation (cf. ref. [2], p. 16)**

Source d'exposition	Engagement total de dose en nombre de jours**
Exposition d'une année aux rayonnements naturels	365
Une année de déplacements par voie aérienne (lignes commerciales)	0,4
Utilisation de la production d'une année d'engrais phosphatés au rythme actuel de la production	0,04
Production totale sur une année d'énergie électrique par les centrales au charbon, sur la base de la puissance totale installée actuelle (1000 GWe)	0,02
Une année d'exposition à des produits de consommation émetteurs de rayons	3
Une année de production d'énergie d'origine nucléaire, sur la base de la puissance totale installée actuelle (111 GWe)	0,83
Une année d'explosions d'origine nucléaire sur la base de la moyenne établie pour la période 1951-1976	30
Une année d'utilisation des rayonnements aux fins de diagnostic	70

\*\* L'engagement de dose à l'échelle du monde pour chacune de ces sources de rayonnement est exprimé sous la forme de la durée d'exposition de la population au rayonnement naturel qui entraînerait le même engagement de dose. On a tenu compte des chiffres relatifs à l'irradiation professionnelle.

#### Références

- [1] The Environmental Impacts of Production and Use of Energy: Part II — Nuclear Energy, UNEP Energy Report Series, UNEP, Nairobi (Sept. 1979).
- [2] Sources et effets des rayonnements ionisants, Rapport à l'Assemblée générale et annexes, Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants, New York (1977).