

# Les risques de l'uranium appauvri pour la santé

Ian FAIRLIE

Depuis plus de deux décennies, la question des effets de l'uranium appauvri sur la santé suscite un vif débat public. Les services des armées de nombreux pays utilisent de l'uranium appauvri dans les munitions et s'en servent pour renforcer le blindage des véhicules car l'uranium est un métal très dense (environ 70% plus dense que le plomb) ce qui est utile dans un contexte militaire. L'uranium métal naturel et l'uranium métal appauvri ont, en outre, des propriétés physiques et chimiques très similaires. Les alliages d'uranium appauvri sont très durs et pyrophoriques. Ils sont donc, de par ces propriétés, supérieurs aux munitions perforantes en tungstène. Le blindage en uranium appauvri est aussi plus résistant aux munitions antichars classiques. Les munitions à l'uranium appauvri furent utilisées en grande quantité pour la première fois lors de la guerre du Golfe (1991), en Bosnie (1995) puis au Kosovo (1999). Elles sont encore utilisées en Iraq, depuis 2003, et peut-être en Afghanistan, depuis 2002. Le tableau 1 indique les quantités d'uranium appauvri utilisées au cours de guerres récentes par les forces armées des États-Unis (le pays qui utilise le plus souvent des munitions à l'uranium appauvri).

**Tableau 1. Uranium appauvri utilisé par les États-Unis au cours de guerres récentes (en tonnes)**

guerre du Golfe	guerres des Balkans	guerre en Iraq
286	11	75

Source : National Research Council, 2008, *Review of Toxicologic and Radiologic Risks to Military Personnel from Exposure to Depleted Uranium during and after Combat*, Washington, National Academies Press, tableaux 1 à 4

Au moment de l'impact, l'uranium appauvri peut être dispersé sous forme d'aérosol pouvant être inhalé ou ingéré ou d'éclats qui pénètrent dans les tissus humains. Les rapports qui signalent régulièrement les maladies touchant des combattants<sup>1</sup> et des civils<sup>2</sup> qui se trouvaient dans ces zones de

---

Ian Fairlie est consultant indépendant sur le rayonnement dans l'environnement. Il est diplômé en chimie et en radiobiologie. Il a travaillé pour plusieurs départements ministériels et organismes de réglementation du Royaume-Uni et conseille actuellement des ONG environnementales, le Parlement européen et des autorités locales. Entre 2001 et 2004, il a été membre du Secrétariat d'un comité du Gouvernement britannique, le CERRIE (Committee Examining the Radiation Risks of Internal Emitters) qui a publié son rapport en octobre 2004. L'auteur tient à remercier plusieurs personnes : Prof. D.G. Goodhead, Dr P. Day et Dr A.C. Miller pour l'aide qu'ils lui ont apporté dans la révision de cet article. L'auteur souhaite aussi remercier Dr K. Baverstock pour ses idées sur la partie portant sur les preuves observées sur des cellules humaines (études *in vitro*). Bien évidemment, l'auteur est seul responsable des erreurs qui pourraient subsister.

conflit ont conduit certains à formuler l'hypothèse que ces maladies pouvaient être liées à l'exposition à l'uranium appauvri. (Voir encadré 1 pour un exposé du syndrome de la guerre du Golfe.)

L'uranium appauvri est un déchet de l'énergie nucléaire et de la fabrication d'armes nucléaires. C'est un métal lourd radioactif qui peut être dangereux pour l'homme de quatre façons :

- en tant que métal lourd toxique ;
- en tant qu'agent génotoxique (autrement dit cancérigène et mutagène) de par ses propriétés chimiques ;
- en tant qu'agent génotoxique de par son rayonnement ;
- et en tant que perturbateur endocrinien.

### Encadré 1. Le syndrome de la guerre du Golfe

De nombreux soldats et civils présents dans les zones de la guerre du Golfe ont signalé souffrir de divers symptômes, souvent réunis sous le terme collectif de syndrome de la guerre du Golfe. Il s'agit d'un trouble incapacitant complexe et progressif dont les principaux symptômes sont la fatigue, des douleurs articulaires et de l'appareil locomoteur, des maux de tête, des troubles neuropsychiatriques, la confusion, des problèmes visuels, la transformation de l'allure, la perte de mémoire, des ganglions lymphatiques enflés ou hypertrophiés, l'insuffisance respiratoire, l'impuissance et l'altération fonctionnelle et morphologique des voies urinaires.

Qu'elles qu'en soient les causes, il est certain que ces souffrances sont importantes, mesurables et réelles pour les personnes touchées. Près de 20% de l'ensemble du personnel des États-Unis déployés pendant la guerre du Golfe de 1991 recevaient en 2001 une allocation d'invalidité pour ces effets<sup>a</sup>. Plusieurs études, résumées par Komaroff, ont constaté qu'il était statistiquement plus probable que les forces armées d'un certain nombre de pays déployées dans la région du Golfe persique fassent état de symptômes débilitants chroniques que le personnel militaire déployé dans d'autres régions<sup>b</sup>. Eisen et al. ont calculé la fréquence de maladies chroniques signalées par les combattants de la guerre du Golfe par rapport à un groupe témoin de vétérans qui n'y avaient pas été déployés. Les vétérans déployés souffraient, beaucoup plus que le groupe témoin, de dyspepsie, de maladies de la peau (fibromyalgie) et du syndrome de fatigue chronique. Le plus frappant était la fréquence du syndrome de fatigue chronique<sup>c</sup>.

Certains auteurs<sup>d</sup> pensent que ces symptômes pourraient être dus, au moins en partie, à une exposition à l'uranium appauvri. Il convient toutefois de préciser que nombre des soldats et civils présentant ces symptômes n'ont été exposés qu'à de très petites quantités d'uranium appauvri ou pas du tout exposés. Il est donc peu probable que l'exposition à l'uranium appauvri puisse être la seule explication.

En outre, nombre des personnes engagées dans la guerre du Golfe ont été exposées à de nombreuses substances qui, en théorie, auraient pu produire des lésions tissulaires chroniques : solvants, insecticides, fumée et autres produits de combustion, agents de guerre chimique (inhibiteurs anticholinestérasiques irréversibles, comme le sarin), et bromure de pyridostigmine (un inhibiteur anticholinestérasique réversible pris pour empêcher les effets du sarin). Ajoutons qu'ils avaient, en outre, reçu de nombreuses immunisations simultanées ce qui, selon certains<sup>a</sup>, pourrait expliquer une débilité chronique.

En conclusion, même si le moins que nous puissions dire est que notre compréhension de l'étiologie de ces symptômes est mauvaise, l'on peut difficilement dire que l'exposition à l'uranium appauvri joue plus qu'un rôle mineur.

<sup>a</sup> M. Davis, 2003, « Overview of Illnesses in Gulf War Veterans », in J.M. Colwill (sous la direction de), *Gulf War and Health. Volume 2: Insecticides and Solvents*, Washington, National Academies Press, p. 533 à 561.

<sup>b</sup> A.L. Komaroff, 2005, « Unexplained Suffering in the Aftermath of War », *Annals of Internal Medicine*, vol. 142, n° 11, p. 938 et 939.

<sup>c</sup> S.A. Eisen et al., 2005, « Gulf War Veterans' Health: Medical Evaluation of a US Cohort », *Annals of Internal Medicine*, vol. 142, n° 11, p. 881 à 890.

<sup>d</sup> A. Durakovic, 2003, « Undiagnosed Illnesses and Radioactive Warfare », *Croatian Medical Journal*, vol. 44, n° 5, p. 520 à 532 ; R. Bertell, 2006, « Depleted Uranium: All the Questions about DU and Gulf War Syndrome Are not yet Answered », *International Journal of Health Services*, vol. 36, n° 3, p. 503 à 520.

L'uranium appauvri a une radioactivité qui se situe environ à 75% de celle de l'uranium naturel (voir *infra*). Il a, en outre, la même toxicité chimique, le même effet perturbateur endocrinien et le même pouvoir mutagène que l'uranium naturel.

En raison de la controverse autour de l'uranium appauvri, l'uranium est aujourd'hui l'un des radionucléides les plus étudiés. Au moins neuf rapports officiels sont parus au cours des dix dernières années sur la toxicité et les effets de l'uranium et de l'uranium appauvri sur la santé<sup>3</sup>. Il y a également des analyses intéressantes passant en revue différentes études<sup>4</sup>. Avant la publication récente du rapport du National Research Council (NRC) des États-Unis, les deux rapports faisant autorité étaient ceux de la Royal Society du Royaume-Uni portant respectivement sur les risques chimiotoxiques et les risques de rayonnement. Ils précisaient que l'on pouvait légitimement s'inquiéter des conséquences possibles sur la santé de l'utilisation d'une matière radioactive et chimiotoxique pour la fabrication de munitions, mais concluaient que les munitions à l'uranium appauvri représentaient des risques très faibles pour les soldats<sup>5</sup>. Depuis la parution des rapports de la Royal Society, des études radiobiologiques ont mis en évidence de nouvelles preuves.

Il existe deux grandes sources d'informations sur les risques de l'uranium appauvri pour la santé : d'une part, les études épidémiologiques, autrement dit celles portant sur l'exposition à l'uranium appauvri et les risques accrus éventuels pour les populations humaines, et, d'autre part, les études radiobiologiques sur des cellules et des animaux. Comme nous le verrons, la seconde source apporte beaucoup plus d'informations que la première sur les risques de l'uranium appauvri pour la santé.

### Qu'est-ce que l'uranium appauvri ?

La concentration en uranium naturel de l'écorce terrestre est d'environ 3 parties par million. Certaines régions de minerai d'uranium ont des concentrations beaucoup plus fortes en uranium, environ 1 000 parties par million.

Le cycle du combustible nucléaire commence par l'extraction du minerai d'uranium. L'uranium en est ensuite extrait puis raffiné en bioxyde d'uranium (UO<sub>2</sub>) pour être utilisé dans le combustible nucléaire<sup>6</sup>. L'uranium naturel est constitué de trois isotopes, l'uranium 238, l'uranium 235 et l'uranium 234 (voir tableau 2). L'uranium 238 et l'uranium 235 sont apparus en même temps que la Terre, il y a environ 4,5 milliards d'années. Quant à l'uranium 234 c'est un produit de désintégration de l'uranium 238.

Le point essentiel est le fait que l'uranium 235 est *fissile*, ce qui signifie qu'il permet d'entretenir la fission dans une centrale nucléaire et peut être utilisé dans des armes nucléaires. La plupart des réacteurs sont conçus pour le combustible à l'uranium ayant été légèrement enrichi à l'uranium 235. La concentration en uranium 235, de 0,7%, est généralement augmentée pour atteindre entre 2% et 4%. C'est ce qu'on appelle l'uranium faiblement enrichi. Cette concentration est obtenue par le processus d'enrichissement au cours duquel l'UO<sub>2</sub> est converti en un gaz (l'hexafluorure d'uranium, UF<sub>6</sub>) puis filtré dans des installations de diffusion gazeuse ou d'ultracentrifugation. L'uranium 235 est aussi un élément indispensable pour de nombreuses armes nucléaires, mais la concentration en uranium 235 doit être alors de 90%. C'est ce qu'on appelle l'uranium fortement enrichi.

Les processus d'enrichissement pour les armes nucléaires et le combustible nucléaire engendrent environ 7 tonnes d'uranium appauvri pour chaque tonne d'uranium enrichi produite. Il en résulte de très grandes quantités de déchets d'uranium appauvri. Le groupe STOA (Science and Technology Options Assessment) du Parlement européen a estimé à 35 000 tonnes la production mondiale d'uranium appauvri pour 1996<sup>7</sup>. Par conséquent, les stocks d'uranium représenteraient aujourd'hui plus de 1,2 million de tonnes dans le monde, situés principalement aux États-Unis<sup>8</sup>.

L'uranium appauvri est utilisé dans les écrans de protection radiologique et a servi, par le passé, de contrepoids dans les ailes des avions ; ces utilisations représentent des quantités plus petites que celles produites chaque année. Les plus grands utilisateurs d'uranium appauvri sont les services des armées même si le rapport du groupe STOA a estimé que les munitions utilisées en Iraq et au Kosovo représentaient une quantité totale d'uranium appauvri correspondant à seulement quatre jours de la production mondiale. Les stocks d'uranium appauvri augmentent, chaque année, de 35 000 tonnes et posent de graves problèmes d'évacuation aux gouvernements engagés dans l'enrichissement de l'uranium.

### **Quelle est la radioactivité de l'uranium appauvri par rapport à celle de l'uranium naturel ?**

Il est difficile de répondre à cette question simple. De nombreux rapports estiment que la radioactivité de l'uranium appauvri se situe à 60% de celle de l'uranium naturel. Le chiffre réel est plus proche de 75% pour deux raisons : les installations d'enrichissement utilisent parfois de l'uranium de retraitement (par opposition à de l'uranium provenant à 100% de celui extrait du minerai), et toutes les formes d'uranium appauvri contiennent des produits de désintégration.

#### **L'UTILISATION D'URANIUM RETRAITÉ DANS L'URANIUM APPAUVRI**

L'uranium appauvri utilisé par l'armée des États-Unis contient l'isotope uranium 236 (voir tableau 2), qui n'existe pas dans l'uranium naturel. Cet isotope n'apparaît que dans les réacteurs nucléaires ; sa présence signifie donc que les lots d'uranium appauvri contiennent de l'uranium provenant de déchets issus du retraitement du combustible irradié, une opération effectuée principalement par les États-Unis, la Fédération de Russie, la France et le Royaume-Uni. Il existe donc deux types d'uranium appauvri ; ils proviennent tous deux du processus d'enrichissement, mais l'un compte de petites quantités d'uranium retraité issu du combustible nucléaire irradié.

Cela pose des problèmes car l'uranium retraité est contaminé avec les produits de fission et d'activation du combustible irradié. Les munitions à l'uranium appauvri contiennent parfois le produit de fission technétium 99 et les produits d'activation neptunium 237, plutonium 238, plutonium 239, plutonium 240 et américium 241<sup>9</sup>. L'uranium appauvri produit avec de l'uranium retraité est donc plus radioactif que celui provenant uniquement de l'extraction du minerai d'uranium<sup>10</sup>. La plupart des

**Tableau 2. Principaux isotopes de l'uranium naturel et de l'uranium appauvri**

Isotope	Période radioactive (années)	Activité alpha spécifique (Bq par gramme)	Concentration en uranium naturel (% en poids)	Concentration en uranium appauvri (% en poids)
U-234	$2,46 \times 10^5$	$2,31 \times 10^6$	0,0055	0,001
U-235	$7,04 \times 10^8$	$7,99 \times 10^4$	0,72	0,2
U-236	$2,34 \times 10^7$	$2,40 \times 10^6$	Nulle	0,0003 de l'uranium retraité
U-238	$4,47 \times 10^9$	$1,24 \times 10^4$	99,3	99,8
U naturel	-	$2,53 \times 10^4$	-	-
U appauvri	-	$1,42 \times 10^4$	-	-

Source : Royal Society, 2001, *The Health Hazards Of Depleted Uranium Munitions: Part I*, Londres, Royaume-Uni.

rapports indiquent que les munitions à l'uranium appauvri ne contiennent que de petites quantités de contaminants provenant de combustible nucléaire irradié. Selon le US Office of the Special Assistant for Gulf War Illnesses, la dose de ces contaminants représente moins de 1% de la dose équivalente d'exposition à l'uranium appauvri. Les auteurs ont conclu qu'ils ne représentaient qu'un risque faible<sup>11</sup>. La Royal Society a observé de faibles concentrations dans les lots d'uranium appauvri qu'elle a examinés mais recommande une vigilance permanente sur cette question<sup>12</sup>.

## LES PRODUITS DE DÉSINTÉGRATION DE L'URANIUM

Dès que l'uranium appauvri est utilisé dans des munitions et stocké dans des entrepôts, les isotopes uranium 238 et uranium 235 se désintègrent et engendrent des produits de filiation comme le montrent les tableaux 3 et 4. Dans un délai de six mois, ces produits de filiation sont en équilibre séculaire avec leurs parents, cela signifie que les produits de filiation créés par les parents représentent une quantité égale à ceux qui se désintègrent. Par conséquent, le rayonnement de ces produits de désintégration devrait être inclus dans l'évaluation des dangers que représente l'uranium appauvri. Le point crucial est le fait que les produits de désintégration sont des émetteurs bêta, en particulier le protactinium 234m, qui émet des particules bêta très puissantes. Comme l'explique le rapport de la Royal Society de 2001, ces rayonnements bêta peuvent représenter jusqu'à 40% de la dose absorbée<sup>13</sup> par les tissus proches de fragments inclus dans les lésions. Il importe de comprendre que le risque supplémentaire que représentent les particules bêta des produits de désintégration ne sont, à ce jour, pas pris en compte par la Commission internationale de protection radiologique (CIPR) dans ses coefficients de dose (qui correspondent aux doses de rayonnement émises par des substances radioactives incluses dans l'organisme) pour les isotopes d'uranium.

Bishop<sup>14</sup> a calculé le total des émissions alpha, bêta et gamma émises en une année par des échantillons d'un gramme d'uranium naturel et d'uranium appauvri. Il a conclu que la radioactivité de l'uranium appauvri avec ses produits de désintégration en équilibre se situe à 75% de celle de l'uranium naturel avec ses produits de désintégration. Le rapport du groupe STOA du Parlement européen, qui se fonde sur une méthode plus rudimentaire, estime que la radioactivité de l'uranium appauvri représente 80% de celle de l'uranium naturel. Tout cela montre bien que l'adjectif « appauvri » peut être trompeur : il serait plus juste de dire « légèrement moins radioactif ».

**Tableau 3. Famille radioactive de l'uranium 238<sup>a</sup>**

Nucléide	Période radioactive	Désintégration	Énergie (MeV)
U-238	4,5 x 10 <sup>9</sup> années	alpha	4,198
Th-234	24 jours	bêta	0,199
Pa-234m	1,2 minute	bêta	2,271
Pa-234	6,7 heures	bêta	0,471
U-234	2,5 x 10 <sup>5</sup> années	alpha	4,775

<sup>a</sup> Tronquée après l'uranium 234 qui, pour des raisons pratiques, termine la chaîne de désintégration à cause de sa très longue période radioactive.

**Tableau 4. Famille radioactive tronquée de l'uranium 235**

Nucléide	Période radioactive	Désintégration	Énergie (MeV)
U-235	7,0 x 10 <sup>8</sup> années	alpha	4,596
Th-231	26 heures	bêta	0,390
Pa-231	3,3 x 10 <sup>4</sup> années	alpha	5,059

**L'adjectif « appauvri » peut être trompeur : il serait plus juste de dire « légèrement moins radioactif ».**

## ***Les voies d'exposition à l'uranium appauvri***

### L'URANIUM APPAUVRI DANS L'ENVIRONNEMENT

Il existe plusieurs voies d'exposition à l'uranium appauvri. L'une est le rayonnement externe : le rayonnement bêta (et dans une moindre mesure le rayonnement gamma) des produits de désintégration de l'uranium appauvri irradie l'organisme. Cette exposition est, dans la plupart des cas, très faible. L'exposition interne est, quant à elle, beaucoup plus importante. Elle résulte de l'inhalation de poussières et d'aérosols d'uranium appauvri, de l'ingestion d'eau ou d'aliments contaminés ou de fragments contenant de l'uranium appauvri inclus dans des lésions.

Lorsque des véhicules blindés sont touchés par des projectiles à l'uranium appauvri, leurs occupants sont souvent blessés par des éclats contenant de l'uranium appauvri qui peuvent rester très longtemps dans l'organisme. Selon l'épaisseur et les matériaux de blindage, lorsque des chars sont frappés par des projectiles à l'uranium appauvri, environ 10% de cet uranium<sup>15</sup> prend la forme de particules d'aérosol qui brûlent immédiatement en oxyde d'uranium faiblement soluble pouvant rester en fortes concentrations dans des espaces clos. Ces aérosols peuvent contenir de très fines particules d'oxyde d'uranium d'un diamètre compris entre 0,1 et 10 microns<sup>16</sup> de diamètre pouvant être inhalées et se déposer dans les poumons. Les globules blancs récupèrent ces particules et les conduisent jusqu'aux nœuds lymphatiques trachéobronchiques où elles resteront longtemps. Il est peu probable que ces particules, qui sont généralement insolubles, soient détectées dans des échantillons d'urine. Par conséquent, la pratique consistant à prélever des échantillons d'urine des soldats revenant de zones où des munitions à l'uranium appauvri ont été utilisées peut être inefficace pour détecter l'exposition à l'oxyde d'uranium.

### L'URANIUM APPAUVRI ET L'ÊTRE HUMAIN

La diffusion initiale des composés de l'uranium dépend fortement de leur solubilité et de la voie d'absorption. D'importantes quantités de composés solubles de l'uranium sont absorbées. Par exemple, 2h 30 après l'administration d'uranium, il en restait entre 20 et 30% dans les os des rats mâles et, 40 jours plus tard, 90% de l'uranium restant se trouvait dans les os<sup>17</sup>.

Les composés de l'uranium se diffusent dans tous les tissus, essentiellement dans les os, les reins, le foie et les testicules<sup>18</sup>. Les rats avec des implants d'uranium appauvri ont également des concentrations d'uranium dans le cœur, le tissu pulmonaire, les ovaires et les ganglions lymphatiques<sup>19</sup>. Comme de nombreux métaux lourds, l'uranium réagit avec l'ADN, les ions et les protéines sanguines pour constituer des composés (appelés complexes). L'uranium peut traverser le placenta et la barrière hémato-encéphalique et s'accumuler dans le cerveau. Les composés solubles de l'uranium sont éliminés beaucoup plus rapidement que les composés insolubles : les deux tiers de l'uranium présent dans le sang sont éliminés par les urines dans un délai de 24 heures. L'élimination de l'uranium soluble est effectuée principalement par les reins et les urines. Quant à l'uranium appauvri contenu dans les fragments inclus dans les tissus il se diffuse lentement : il faut environ une année et demie pour excréter 80 à 90% de l'uranium présent dans les os<sup>20</sup>.

## ***Les effets de l'uranium appauvri sur la santé***

L'on sait depuis la deuxième guerre mondiale que l'uranium, un métal lourd radioactif, est dangereux sur deux plans pour l'être humain. Comme d'autres métaux lourds, tels que le chrome, le plomb, le nickel et le mercure, l'uranium est chimiotoxique pour les reins, le système cardiovasculaire, le foie,

les muscles et le système nerveux. En outre, les isotopes de l'uranium étant radioactifs, ils émettent un rayonnement, un agent cancérigène connu. Cela semblait devoir être une préoccupation surtout dans les cas d'inhalation de poussières ou d'aérosols d'uranium car, en restant longtemps dans les poumons, ils risquent de provoquer des cancers du poumon.

Cela explique pourquoi aux États-Unis, le pays ayant peut-être la réglementation la plus détaillée sur l'uranium, l'exposition à l'uranium est contrôlée sur deux plans par les autorités chargées de la protection contre le rayonnement et de la réglementation chimique : des doses maximales d'exposition des poumons au rayonnement de l'uranium par des particules insolubles d'uranium ; et par des concentrations maximales de composés solubles d'uranium, en particulier dans les reins<sup>21</sup>. Il faut généralement une concentration d'uranium moindre pour avoir des effets chimiques toxiques que pour produire des effets de rayonnement<sup>22</sup>.

#### LA CANCÉROGÉNÉCITÉ CHIMIQUE DE L'URANIUM APPAUVRI

Les scientifiques sont de plus en plus attentifs aux risques que l'uranium et l'uranium appauvri représentent pour les êtres humains sur un troisième plan : ils sont chimiquement (et radiologiquement) cancérigènes. Cela augmente considérablement notre perception des risques que représentent l'uranium appauvri et l'uranium naturel. De faibles concentrations d'uranium soluble dans l'organisme – considérées jusqu'à présent comme inoffensives (et qui étaient donc négligées) – pourraient être cancérigènes sans seuil d'effet. Autrement dit, même si la concentration en uranium ou en uranium appauvri est faible, un petit risque de cancérogenèse demeure. Taylor et Taylor ont toutefois estimé que ce risque était très faible<sup>23</sup>.

Le rapport de 2001 de la Royal Society examine les preuves nouvelles concernant la cancérogénicité chimique de l'uranium appauvri, et laisse entendre que les effets chimiques et le rayonnement de l'uranium pourraient agir en synergie, ce qui signifierait qu'il faudrait multiplier et non pas simplement ajouter leurs effets. Plus récemment, le rapport du NRC a examiné la cancérogénicité chimique de l'uranium et exprimé des avis divers. Par exemple, le chapitre 7 réclamait des recherches pour déterminer s'il existe un mécanisme chimique de cancérogenèse de l'uranium. Le chapitre 8 recommandait pourtant que des études soient menées pour déterminer le rôle des mécanismes chimiques et radiologiques de la cancérogenèse de l'uranium<sup>24</sup>.

#### L'URANIUM EN TANT QUE PERTURBATEUR ENDOCRINIEN

Aux États-Unis, des preuves récentes tendent à montrer que l'uranium appauvri pourrait être dangereux pour les êtres humains sur un quatrième plan : il peut être un perturbateur endocrinien, autrement dit avoir une incidence sur les hormones. Un certain nombre d'études montrent que les métaux lourds peuvent être des perturbateurs endocriniens<sup>25</sup>. Par exemple, le cadmium stimule, chez l'être humain, la prolifération de cellules cancéreuses du sein<sup>26</sup>, interagit avec les récepteurs des œstrogènes<sup>27</sup> et stimule les réponses œstrogéniques *in vivo*<sup>28</sup>.

Raymond-Whish *et al.* ont étudié si l'uranium appauvri ajouté à de l'eau de boisson provoquait, dans le tractus reproductif de la souris femelle, des réactions similaires à celles du diéthylstilbestrol. Ils ont conclu que l'uranium était un perturbateur endocrinien et que les populations exposées à l'uranium dans l'environnement (et notamment celles qui vivent, aux États-Unis, près des déchets des mines d'uranium) devraient être examinées car elles présentent un risque accru de problèmes de fertilité et de cancers du système reproducteur<sup>29</sup>.

## **Les études épidémiologiques et celles portant sur des cellules, sur des animaux et sur l'homme**

### LES PREUVES OBSERVÉES SUR DES CELLULES HUMAINES (ÉTUDES *IN VITRO*)

Des recherches indiquent que l'exposition *in vitro* de cellules humaines à de l'uranium appauvri produit des effets génotoxiques et des phénomènes cellulaires étroitement liés à la cancérogénèse. Ces phénomènes cellulaires sont les suivants :

- instabilité génomique, un processus qui joue un rôle dans la cancérogénèse<sup>30</sup> ;
- évolution vers un état tumorigène : une fois qu'elles sont injectées dans des souris, les cellules touchées évoluent en cancers<sup>31</sup> ;
- provocation de mutations dont la présence caractérise la plupart des cancers<sup>32</sup> ;
- dommage oxydatif de l'ADN<sup>33</sup> ;
- activation de certaines voies d'expression génétique<sup>34</sup> ;
- formation d'adduits U à l'ADN<sup>35</sup> ;
- induction de chromosomes dicentriques, un changement des cellules humaines lié au rayonnement<sup>36</sup> ;
- et altération chromosomique<sup>37</sup>.

### LES PREUVES OBSERVÉES CHEZ DES ANIMAUX (ÉTUDES *IN VIVO*)

Des études de longue durée portant sur l'inhalation d'oxyde d'uranium (autrement dit insoluble) par des singes montrent le caractère cancérogène de ce type d'exposition pour les poumons et peut-être son influence sur le lymphome non hodgkinien<sup>38</sup>. Monleau *et al.* ont mesuré, chez des rats ayant inhalé de l'uranium appauvri, l'apparition de cassures double brin de l'ADN<sup>39</sup>. Hahn *et al.* ont constaté un risque élevé de cancer chez les rats sur lesquels de petites feuilles d'uranium appauvri ont été implantées. Ils ont conclu que les fragments contenant de l'uranium appauvri inclus dans les tissus musculaires étaient cancérogènes s'ils étaient assez gros ; ils ont toutefois précisé que le mécanisme n'était pas clair<sup>40</sup>.

Miller *et al.* ont mené une étude. Des fragments contenant de l'uranium appauvri ont été implantés pendant trois mois à des souris qui ont ensuite reçu, par injection, des cellules progéniteurs. Miller *et al.* ont constaté que 75% de ces souris avec développé la leucémie (contre 10% sur les souris témoins). L'appareil locomoteur des souris avait également changé avec des formations ou remodelages osseux après une exposition orale, intrapéritonéale, intraveineuse et une implantation d'uranium<sup>41</sup>.

Des études *in vivo* réalisées sur des rats avec des implants d'uranium appauvri ont constaté une expression aberrante d'oncogènes et de gènes suppresseurs de tumeur associés à la cancérogénèse<sup>42</sup>. Même si ces effets peuvent être dus au rayonnement de l'uranium appauvri, de nombreux éléments laissent à penser que les effets chimiques l'emportent. Dans les essais *in vitro* de transformation et d'échange de chromatides-sœurs, les effets induits étaient beaucoup plus fréquents que ce que l'on aurait pu penser vu le très petit nombre de cellules touchées par une particule alpha (une cellule sur 100 000 touchée par une particule d'uranium appauvri de 10 $\mu$ m). En outre, des fréquences similaires de transformation ont été observées avec les métaux lourds cancérogènes non radioactifs que sont le nickel et le plomb ; d'aucuns ont spéculé que la génotoxicité de l'uranium appauvri pouvait être due à des ions uranyles induisant la production de radicaux libres, surtout si les ions sont chélatés à l'ADN comme d'autres ions métalliques<sup>43</sup>.

## LES PREUVES OBSERVÉES CHEZ L'HOMME

L'uranium est une néphrotoxine (effet toxique sur les reins) bien connue pour l'homme, sa cible principale étant le tube contourné proximal. Les dommages se produisent lorsque l'uranium constitue, avec les ligands de phosphate et les protéines, dans les parois tubulaires, des complexes qui gênent le fonctionnement des reins. Les biomarqueurs de ces effets sont l'enzymurie et une excrétion accrue de petites protéines, d'acides aminés et de glucose. L'uranium est aussi une substance ostéotrope et s'intègre à la matrice osseuse en déplaçant du calcium pour constituer des complexes avec des groupements phosphate<sup>44</sup>.

McDiarmid *et al.* ont constaté une augmentation statistiquement importante des mutations des lymphocytes périphériques chez trois vétérans américains de la guerre du Golfe dont l'organisme contenait des fragments métalliques comprenant de l'uranium appauvri comme le révélèrent les mesures d'uranium effectuées sur les urines. Leur surveillance régulière (pendant 14 ans) n'a toutefois pas permis de mettre en évidence un dysfonctionnement du système reproducteur des hommes, d'anomalies du sperme ni d'altérations de la fonction neuroendocrine<sup>45</sup>. Il convient toutefois de rappeler que les soldats sont un sous-groupe sain de la population et que, dans ces études, le nombre de soldats exposés est relativement faible. Monleau *et al.* ont constaté que des inhalations répétées d'uranium avaient tendance à accroître les effets génotoxiques de l'uranium ou à agir en synergie<sup>46</sup>. Zaire *et al.* ont observé des aberrations chromosomiques chez les ouvriers des mines d'uranium en Namibie<sup>47</sup>. Ces changements du matériel génétique des chromosomes jouent un rôle dans le processus cancérogène.

## LES ÉTUDES ÉPIDÉMIOLOGIQUES

Peu d'études épidémiologiques sur les êtres humains donnent des preuves convaincantes des effets de l'exposition à l'uranium appauvri. La Royal Society a examiné 14 études épidémiologiques d'exposition professionnelle à l'uranium de personnes travaillant dans l'extraction, le concassage et l'usinage de l'uranium<sup>48</sup>. Elles ne mettent pas en évidence une augmentation de la mortalité à cause de cancers ou de néphropathies liés à l'inhalation ou l'ingestion d'uranium. Le rapport insiste néanmoins sur la nécessité d'interpréter avec attention ces études. En effet, il existe peu de données fiables sur les niveaux d'exposition à l'uranium des travailleurs concernant notamment les premières années du traitement de l'uranium, lorsque l'on pensait que l'exposition par inhalation de poussières contenant de l'uranium était élevée. En outre, le tabagisme est un facteur de confusion important, provoquant environ 90% des cancers du poumon mais aucune de ces études n'a pu disposer de données sur les habitudes tabagiques. Un autre problème est l'effet du travailleur sain. Les comparaisons de risque devraient se faire avec d'autres travailleurs et non pas la population générale. Le rapport soulignait que ce genre d'études épidémiologiques ne permet pas de détecter de petites augmentations de risques, mais peut voir que le risque a doublé.

Il est une règle capitale en épidémiologie : l'absence de preuve dans une étude ne peut servir à affirmer la preuve d'une absence<sup>49</sup>. Dans de nombreux cas, cela peut signifier que l'étude n'était pas assez poussée pour détecter un risque accru.

Un certain nombre d'études ont étudié les effets sur la santé du personnel militaire<sup>50</sup>, mais leur brève exposition à des aérosols ou des poussières d'uranium a été très inférieure à celle des personnes engagées dans des activités d'extraction et de concassage du minerai d'uranium. Malheureusement, très peu d'études ont été faites sur les nombreux civils qui ont été exposés à de l'uranium appauvri au cours de conflits<sup>51</sup>. Celles qui ont été effectuées soulèvent autant de questions qu'elles apportent de réponses, surtout s'agissant des taux inhabituellement bas de malformations congénitales en Iraq avant 1990<sup>52</sup>. Hindin *et al.* ont procédé à une étude approfondie de la littérature publiée sur les

malformations congénitales suite à l'exposition à l'uranium appauvri du personnel militaire des États-Unis et ont conclu que les preuves épidémiologiques des études sur l'homme révélaient un risque accru de malformation congénitale chez les enfants des personnes ayant été exposées à l'uranium appauvri.

### **Une synergie éventuelle des effets du rayonnement et des effets chimiques**

De nombreuses études indiquent clairement que l'uranium appauvri a des effets chimique et de rayonnement. Une question importante se pose : existe-t-il une synergie, peuvent-ils potentialiser leurs effets ? Certains éléments donnent à réfléchir :

- des effets synergiques lorsque l'exposition au nickel est combinée à un rayonnement gamma<sup>53</sup> ;
- des cellules de voisinage (autrement dit non irradiées) sont vulnérables aux effets chimiques et à ceux du rayonnement<sup>54</sup>.

Plusieurs auteurs ont émis des théories sur la possibilité d'une telle synergie. Par exemple, Miller *et al.* estiment que les effets chimiques et radiologiques de l'uranium appauvri pourraient influencer l'apparition et le développement de tumeurs<sup>55</sup>. Si tel était le cas, ce serait un exemple de synergie.

De plus, selon la Royal Society, on pourrait supposer que la possibilité d'effets synergiques entre le rayonnement et l'action chimique de l'uranium appauvri serait plus grande dans le voisinage des particules ou fragments d'uranium appauvri. Toutes les cellules voisines seraient chimiquement exposées et pourraient donc être sensibilisées à des particules de désintégration radioactive<sup>56</sup>.

Elle concluait sur la nécessité d'autres études pour examiner la possibilité d'une synergie entre les effets chimiques et le rayonnement de l'uranium appauvri. Le rapport du NRC recommande aussi d'effectuer des études pour déterminer le rôle des mécanismes chimiques et radiologiques de la cancérogénèse due à l'uranium. Il ajoutait que si la contribution chimique s'avérait importante, des études devraient être menées pour calculer le risque de cancer résultant des effets chimiques et radiologiques combinés.

### **Conclusions**

Malgré les nombreux rapports consacrés à l'uranium appauvri, il est difficile d'évaluer si l'exposition à l'uranium appauvri accroît les risques d'un mauvais état de santé pour les soldats et autres personnes exposés (et, si oui, dans quelle mesure). Cela s'explique par les résultats peu concluants des rapports, les grandes incertitudes concernant les doses évaluées et les risques liés à l'exposition à l'uranium appauvri, la présence éventuelle de facteurs de confusion et le manque de données concernant l'exposition sur le champ de bataille et ailleurs. En d'autres mots, les données épidémiologiques disponibles sont rares et peu concluantes.

Toutefois, comme nous l'avons montré plus haut, il existe deux sources principales de données concernant les risques de l'uranium : les études sur des cellules et des animaux et les études épidémiologiques. En fait, les risques chimiques de l'uranium sont tirés des premières pour les règles de sécurité. En règle générale, pour quasiment tous les éléments chimiques, le calcul des risques se fonde sur des concentrations qui ne sont pas nocives pour les animaux. Ces concentrations sont divisées par des facteurs de sécurité compris en 10 et 1 000 pour les êtres humains. Autrement dit, les concentrations acceptables pour l'homme sont 10 ou 1 000 fois plus sûres que celles retenues pour les animaux. Ce système de précaution assez simple fonctionne bien.

Cette mesure de précaution n'est toutefois pas retenue pour les radionucléides. Au contraire, les scientifiques du rayonnement insistent pour que le calcul du risque se fonde sur des données humaines (autrement dit des études épidémiologiques). Certains pensent que ce serait préférable car les êtres humains sont différents des animaux et des cellules. Ils ont en théorie raison, mais la réalité n'est pas aussi simple : les études épidémiologiques présentent un grand nombre de difficultés pratiques. Elles ne sont, en réalité, qu'un instrument imprécis et l'on pourrait sous-estimer les risques que représente l'uranium appauvri à ne se fonder que sur des études épidémiologiques plutôt que d'utiliser aussi les études sur des animaux et des cellules.

Le fait de ne se fonder que sur des données épidémiologiques risque de minimiser l'importance des nombreuses preuves radiobiologiques qui indiquent, dans leur grande majorité, que l'uranium appauvri est une substance très dangereuse<sup>57</sup>. Les preuves semblent indiquer que l'uranium appauvri est :

- un carcinogène chimique, mutagène et tératogène ;
- un carcinogène radiologique, mutagène et tératogène ;
- une toxine chimique avec des effets marqués sur les reins et d'autres organes ;
- et un perturbateur endocrinien.

En fait, la réticence à se fonder sur les nombreux résultats de la radiobiologie pourrait être considérée comme une violation du principe de précaution<sup>58</sup>.

Vu l'importance des études effectuées sur des cellules et des animaux indiquant que l'uranium appauvri est une substance très dangereuse, il serait plus sûr de chercher à conclure un moratoire sur son emploi. Il convient de noter que, en décembre 2007, l'Assemblée générale des Nations Unies adopta, par 136 voix contre 5, une motion reconnaissant les préoccupations concernant les effets sur la santé des armes à l'uranium et demandant que les États soumettent au Secrétaire général leurs vues sur la question<sup>59</sup>. En mai 2008, le Parlement européen adopta aussi une motion renouvelant avec force son appel à tous les États membres de l'Union européenne et aux pays membres de l'Organisation du Traité de l'Atlantique Nord d'imposer un moratoire sur l'emploi d'armes contenant de l'uranium appauvri, de redoubler d'efforts en vue de leur interdiction mondiale. La résolution fut adoptée par 491 voix contre 18, avec 12 abstentions<sup>60</sup>.

## **Recommandations**

Pour des raisons pratiques, il faudrait que l'uranium appauvri soit considéré comme étant aussi radioactif que l'uranium naturel. S'agissant des coefficients de dose pour l'uranium et l'uranium appauvri, il faudrait par précaution supposer que les isotopes de l'uranium sont en équilibre avec leurs principaux produits de désintégration (la Commission internationale de protection radiologique suppose le contraire). Cela signifie qu'il faudrait augmenter de 40% les coefficients de dose de l'uranium 238 ce qui augmenterait de 40% les doses (et, par conséquent, les risques) de l'uranium et de l'uranium appauvri.

Il est aussi recommandé de maintenir la surveillance des isotopes sur les nouveaux lots d'uranium appauvri pour veiller à ce que de l'uranium appauvri retraité ne soit pas ajouté à de l'uranium appauvri extrait du minerai d'uranium.

## **D'autres recherches**

Si de nombreuses études ont tenté d'évaluer l'exposition à l'uranium appauvri et les risques probables pour le personnel militaire engagé dans la guerre du Golfe, relativement peu ont porté sur les civils. La

plupart des études militaires ont conclu que l'exposition et les risques encourus étaient mineurs et trop faibles pour être décelés dans le cadre d'études épidémiologiques chez les soldats exposés à l'uranium appauvri, qui sont relativement peu nombreux. Cela étant, d'autres études sur le personnel militaire ne semblent pas nécessaires. Il faudrait par contre s'intéresser aux effets sur la santé des dizaines de milliers de civils iraqiens qui ont été exposés à l'uranium appauvri et leurs enfants. Les populations exposées à l'uranium appauvri et à l'uranium naturel devraient être examinées pour des risques accrus de problèmes de fertilité et de cancers du système reproducteur.

D'autres recherches radiobiologiques sont recommandées sur les éventuels effets synergiques de l'exposition à l'uranium appauvri. Enfin, il faudrait d'autres recherches pour étudier les propriétés de l'uranium appauvri en tant qu'éventuel perturbateur endocrinien.

#### Notes

1. Voir, par exemple, Naomi Harley *et al.*, 1999, *A Review of the Scientific Literature As It Pertains to Gulf War Illnesses, Volume 7: Depleted Uranium*, Santa Monica (Californie), RAND Corporation.
2. Voir, par exemple, M. Aitken, 1999, « Gulf War Leaves Legacy of Cancer », *British Medical Journal*, août, vol. 319, p. 401.
3. National Research Council, 2008, *Review of Toxicologic and Radiologic Risks to Military Personnel from Exposure to Depleted Uranium During and After Combat*, Washington, National Academies Press ; M.A. Parkhurst *et al.*, 2004, *Depleted Uranium Aerosol Doses and Risks: Summary of U.S. Assessments*, Battelle Press ; Royal Society, 2001, *The Health Hazards of Depleted Uranium Munitions: Part I*, Londres ; Royal Society, 2002, *The Health Hazards of Depleted Uranium Munitions: Part II*, Londres ; Organisation mondiale de la Santé, 2001, *Uranium appauvri : sources, exposition et effets sur la santé*, document de l'OMS WHO/SDE/PHE/01.1, Genève ; Carolyn E. Fulco *et al.* (sous la direction de), 2000, *Gulf War and Health, Volume 1: Depleted Uranium, Sarin, Pyridostigmine Bromide, Vaccines*, Washington, National Academies Press, chap. 4 ; Office of the Special Assistant for Gulf War Illnesses (OSAGWI), 2000, *Environmental Exposure Report: Depleted Uranium* ; Harley *et al.*, op. cit. ; Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Ministère américain de la santé et des services sociaux, 1999, *Toxicological Profile for Uranium*, Atlanta (Géorgie).
4. D.M. Taylor et S.K. Taylor, 1997, « Environmental Uranium and Human Health », *Reviews on Environmental Health*, vol. 12, n° 3, p. 147 à 157 ; S. Fetter et F.N. von Hippel, 1999, « The Hazard Posed by Depleted Uranium Munitions », *Science & Global Security*, vol. 8, n° 2, p.125 à 161 ; D. Brugge *et al.*, 2005, « Exposure Pathways and Health Effects Associated with Chemical and Radiological Toxicity of Natural Uranium: A Review », *Reviews on Environmental Health*, vol. 20, n° 3, p. 177 à 193 ; A.C. Miller (sous la direction de), 2007, *Depleted Uranium: Properties, Uses, and Health Consequences*, Boca Raton (Floride), CRC Press.
5. Selon le rapport, l'exposition à des doses suffisamment élevées pourrait accroître la fréquence de certains cancers, en particulier celle du cancer du poumon, et peut-être de la leucémie, et pourrait toucher les reins. Selon l'hypothèse la plus pessimiste, elle peut signifier environ 1,2 mort supplémentaire pour 1 000 d'un cancer du poumon parmi les personnes ayant connu l'exposition la plus forte (par exemple, les survivants d'un véhicule frappé par un pénétrateur à l'uranium appauvri) (Royal Society, 2001, op. cit., p. 21).
6. L'extraction du minerai d'uranium est très destructrice pour l'environnement local et le raffinage de l'uranium engendre de grandes quantités de résidus radioactifs qui libèrent pendant des milliers d'années de grandes quantités des gaz radioactifs radon et thoron.
7. Science and Technology Options Assessment, 2001, *Depleted Uranium: Environmental and Health Effects in the Gulf War, Bosnia and Kosovo*, document STOA 100 EN.
8. Wise Uranium Project, *Depleted Uranium Inventories*, <[www.wise-uranium.org/eddat.html](http://www.wise-uranium.org/eddat.html)>, dernière mise à jour le 21 avril 2008.
9. Royal Society, 2002, op. cit. ; R.K. Bhat, 2000, *Tank-Automotive and Armaments Command (TACOM) and Army Material Command (AMC) Review of Transuranics (TRU) in Depleted Uranium Armor*, Memorandum, Fort Belvoir (Virginie), Army Test Measurement and Diagnostic Equipment Activity.
10. E.R. Trueman *et al.*, 2003, « Characterisation of Depleted Uranium (DU) from an Unfired CHARM-3 Penetrator », *Science of the Total Environment*, vol. 327, numéros 1 à 3, p. 337 à 340.
11. OSAGWI, 2000, op. cit.
12. Royal Society, 2002, op. cit.
13. Soit 2% de la dose équivalente.
14. D. Bishop, pas de date, *Why Depleted Uranium Exhibits More than 60% of the Radioactivity of Natural Uranium*, *International Depleted Uranium Study Team*, <[www.idust.net/index\\_files/page0009.htm](http://www.idust.net/index_files/page0009.htm)>, p. 4.

15. Harley *et al.*, op. cit.
16. Un micron (1  $\mu\text{m}$ ) =  $10^{-6}$  mètre soit un millionième de mètre.
17. T.C. Pellmar *et al.*, 1999, « Distribution of Uranium in Rats Implanted with Depleted Uranium Pellets », *Toxicological Sciences*, vol. 49, n° 1, p. 29 à 39.
18. OMS, op. cit.
19. D.P. Arfsten *et al.*, 2001, « A Review of the Effects of Uranium and Depleted Uranium Exposure on Reproduction and Fetal Development », *Toxicology and Industrial Health*, vol. 17, numéros 5 à 10, p. 182.
20. Brugge *et al.*, op. cit.
21. D.K. Craig, 2001, « Chemical and Radiological Toxicity of Uranium and Its Compounds », document WSRC-TR-2001-00331, préparé pour Westinghouse Savannah River Company, <sti.srs.gov/fulltext/tr2001331/tr2001331.html>.
22. H.M. Hartmann *et al.*, 2000, « Overview of Toxicity Data and Risk Assessment Methods for Evaluating the Chemical Effects of Depleted Uranium Compounds », *Human and Ecological Risk Assessment*, vol. 6, n° 5, p. 851 à 874.
23. Taylor and Taylor, op. cit.
24. Malheureusement, depuis 2004, les forces armées des États-Unis semblent n'avoir pas financé d'autres recherches sur la cancérogénicité de l'uranium appauvri. L'Institut de recherche radiobiologique des forces armées a réduit considérablement ses travaux d'avant-garde sur cette question.
25. C.A. Dyer, 2007, « Heavy Metals as Endocrine-disrupting Chemicals », in A.C. Gore (sous la direction de), *Endocrine-Disrupting Chemicals: From Basic Research to Clinical Practice*, Totowa (New Jersey), Humana Press, p. 111 à 133.
26. M. Brama *et al.*, 2007, « Cadmium Induces Mitogenic Signaling in Breast Cancer Cell by an ER-dependent Mechanism », *Molecular and Cellular Endocrinology*, vol. 264, numéros 1 et 2, p. 102 à 108.
27. Ibid.
28. C. Alonso-González *et al.*, 2007, « Melatonin Prevents the Estrogenic Effects of Sub-chronic Administration of Cadmium on Mice Mammary Glands and Uterus », *Journal of Pineal Research*, vol. 42, n° 4, p. 403 à 410.
29. S. Raymond-Whish *et al.*, 2007, « Drinking Water with Uranium below U.S. EPA Water Standard Causes Estrogen Receptor-dependent Responses in Female Mice », *Environmental Health Perspectives*, vol. 115, n° 12, p. 1711 à 1716.
30. A.C. Miller *et al.*, 2003, « Genomic Instability in Human Osteoblast Cells after Exposure to Depleted Uranium: Delayed Lethality and Micronuclei Formation », *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 64, numéros 2 et 3, p. 247 à 259 ; K. Baverstock, 2006, Présentation à la Commission de la défense de la Chambre des représentants de Belgique, 20 novembre 2006, <www.bandedpleteduranium.org/en/a/128.html>.
31. A.C. Miller *et al.*, 1998, « Urinary and Serum Mutagenicity Studies with Rats Implanted with Depleted Uranium or Tantalum Pellets », *Mutagenesis*, novembre, vol. 13, n° 6, p. 643 à 648 ; A.C. Miller *et al.*, 2005, « Leukemic Transformation of Haematopoietic Cells in Mice Internally Exposed to Depleted Uranium », *Molecular and Cellular Biochemistry*, vol. 279, numéros 1 et 2, p. 97 à 104 ; Z.H. Yang *et al.*, 2002, « Transformation maligne de la cellule épithéliale bronchiale humaine (BEAS-2B) induite par l'uranium appauvri » [article en chinois], *Ai Zheng*, septembre, vol. 21, n° 9, p. 944 à 948 ; A.C. Miller *et al.*, 2002, « Potential Late Health Effects of Depleted Uranium and Tungsten Used in Armor-piercing Munitions: Comparison of Neoplastic Transformation and Genotoxicity with the Known Carcinogen Nickel », *Military Medicine*, vol. 167, n° 2 (supp.), p. 120 à 122 ; A.C. Miller *et al.*, 2002, « Observation of Radiation-specific Damage in Human Cells Exposed to Depleted Uranium: Dicentric Frequency and Neoplastic Transformation as Endpoints », *Radiation Protection Dosimetry*, vol. 99, p. 275 à 278.
32. M.A. McDiarmid, 2004, « Health Effects of Depleted Uranium on Exposed Gulf War Veterans: A 10-year Follow-up », *Journal of Toxicology and Environmental Health A*, vol. 67, n° 4, p. 277 à 296 ; D.M. Stearns *et al.*, 2005, « Uranyl Acetate Induces hprt Mutations and Uranium-DNA Adducts in Chinese Hamster Ovary EM9 Cells », *Mutagenesis*, vol. 20, n° 6, p. 417 à 423 ; A.C. Miller, *et al.*, 2007, « Observation of Radiation-specific Damage in Cells Exposed to Depleted Ranium: hprt Gene Mutation Frequency », *Radiation Measurements*, vol. 42, numéros 6 et 7, p. 1029 à 1032.
33. A.C. Miller *et al.*, 2002, « Depleted Uranium-catalyzed Oxidative DNA Damage: Absence of Significant Alpha Particle Decay », *Journal of Inorganic Biochemistry*, vol. 91, n° 1, p. 246 à 252.
34. A.C. Miller *et al.*, 2004, « Effect of the Militarily-relevant Heavy Metals, Depleted Uranium and Heavy Metal Tungsten Alloy on Gene Expression in Human Liver Carcinoma Cells (HepG2) », *Molecular and Cellular Biochemistry*, vol. 255, numéros 1 et 2, p. 247 à 256.
35. Stearns *et al.*, op. cit.
36. R.H. Lin *et al.*, 1993, « Cytogenetic Toxicity of Uranyl Nitrate in Chinese Hamster Ovary Cells », *Mutation Research*, vol. 319, n° 3, p. 197 à 203 ; A.C. Miller *et al.*, 1998, « Transformation of Human Osteoblast Cells to the Tumorigenic Phenotype by Depleted Uranium-Uranyl Chloride », *Environmental Health Perspectives*, vol. 106, n° 8, p. 465 à 471 ; A.C. Miller *et al.*, 2000, « Potential Health Effects of the Heavy Metals, Depleted Uranium and Tungsten, Used in Armor-piercing Munitions: Comparison of Neoplastic Transformation, Mutagenicity, Genomic Instability, and Oncogenesis », *Metal Ions in Biology and Medicine*, vol. 6, p. 209 à 211.

37. S.S. Wise, 2007, « Particulate Depleted Uranium Is Cytotoxic and Clastogenic to Human Lung Cells », *Chemical Research in Toxicology*, vol. 20, n° 5, p. 815 à 820 ; Q.Y. Hu et S.P. Zhu, 1990, « Induction of Chromosomal Aberrations in Male Mouse Germ Cells by Uranyl Fluoride Containing Enriched Uranium », *Mutation Research*, vol. 244, n° 3, p. 209 à 214.
38. L.J. Leach *et al.*, 1970, « A Five-year Inhalation Study with Natural Uranium Dioxide (UO<sub>2</sub>) Dust. I. Retention and Biologic Effect in the Monkey, Dog and Rat », *Health Physics*, vol. 18, n° 6, p. 599 à 612 ; L.J. Leach *et al.*, 1973, « A Five-year Inhalation Study with Natural Uranium Dioxide (UO<sub>2</sub>) Dust. II. Post-exposure Retention and Biologic Effects in the Monkey, Dog and Rat », *Health Physics*, vol. 25, n° 3, p. 239 à 258.
39. M. Monleau *et al.*, 2006, « Genotoxic and Inflammatory Effects of Depleted Uranium Particles Inhaled by Rats », *Toxicological Sciences*, vol. 89, n° 1, p. 287 à 295.
40. F.F. Hahn *et al.*, 1999, « Toxicity of Depleted Uranium Fragments in Wistar Rats », *Toxicological Sciences*, vol. 48, p. 333 ; F.F. Hahn *et al.*, 2002, « Implanted Depleted Uranium Fragments Cause Soft Tissue Sarcomas in the Muscles of Rats », *Environmental Health Perspectives*, vol. 110, n° 1, p. 51 à 59.
41. Miller *et al.*, 2005, *op. cit.*
42. Miller *et al.*, 1998, « Urinary and Serum Mutagenicity Studies with Rats Implanted with Depleted Uranium or Tantalum Pellets », *op. cit.* ; Miller *et al.*, 2000, « Potential Health Effects of the Heavy Metals, Depleted Uranium and Tungsten, Used in Armor-piercing Munitions », *op. cit.*
43. Miller *et al.*, 1998, « Transformation of Human Osteoblast Cells to the Tumorigenic Phenotype by Depleted Uranium-Uranyl Chloride », *op. cit.* ; Miller *et al.*, 2000, « Potential Health Effects of the Heavy Metals, Depleted Uranium and Tungsten, Used in Armor-piercing Munitions », *op. cit.*
44. J.L. Domingo, 1995, « Chemical Toxicity of Uranium », *Toxicology and Ecotoxicology News* 2, p. 74 à 78.
45. M.A. McDiarmid *et al.*, 2007, « Health Surveillance of Gulf War I Veterans Exposed to Depleted Uranium: Updating the Cohort », *Health Physics*, vol. 93, n° 1, p. 60 à 73.
46. M. Monleau *et al.*, 2006, « Distribution and Genotoxic Effects after Successive Exposure to Different Uranium Oxide Particles Inhaled by Rats », *Inhalation Toxicology*, vol. 18, n° 11, p. 885 à 894.
47. R. Zaire *et al.*, 1996, « Analysis of Lymphocytes from Uranium Mineworkers in Namibia for Chromosomal Damage Using Fluorescence in situ Hybridization (FISH) », *Mutation Research*, vol. 371, n° 1, p. 109 à 113.
48. Royal Society, 2001, *op. cit.*
49. D.G. Altman et J.M. Bland, 1995, « Absence of Evidence Is Not Evidence of Absence », *British Medical Journal*, vol. 311, p. 485.
50. Par exemple, McDiarmid *et al.*, 2004, *op. cit.*, ont examiné du personnel engagé dans la guerre du Golfe.
51. Citons deux exceptions : I. Al-Sadoon *et al.*, 2002, « Depleted Uranium and Health of People in Basrah: Epidemiological Evidence. Incidence and Pattern of Congenital Anomalies among Births in Basrah during the Period 1990–1998 », in Ministry of Higher Education and Scientific Research Republic of Iraq, *Selected Research Works on the Effect of DU on Man & Environment in Iraq*, <idust.net/Docs/IQSRWrks/SelWks03.pdf> ; et T. Fasy, 2003, « The Recent Epidemic of Paediatric Malignancies and Congenital Malformations in Iraq: The Biological Plausibility of Depleted Uranium as a Carcinogen and a Teratogen », présentation lors de l'Iraqi-American Academics' Symposium for Peace. Baghdad University, 14-16 janvier 2003, <www.uraniumconference.org/fasy\_jun\_14\_03.pdf>.
52. Pour une étude des preuves iraqiennes, voir R. Hindin *et al.*, 2005, « Teratogenicity of Depleted Uranium Aerosols: A Review from an Epidemiological Perspective », *Environmental Health*, vol. 4, n° 17.
53. Miller *et al.*, 2002, « Potential Late Health Effects of Depleted Uranium and Tungsten Used in Armor-piercing Munitions », *op. cit.*, p. 275.
54. *Ibid.*, p. 277.
55. Miller *et al.*, 2004, *op. cit.*, p. 254.
56. Royal Society, 2001, *op. cit.*, p. 69.
57. Voir A.C. Miller et D. McClain, 2007, « A Review of Depleted Uranium Biological Effects: in vitro and in vivo Studies », *Reviews on Environmental Health*, vol. 22, n° 1, p. 75 à 89.
58. E. Hey, 1995, « The Precautionary Principle. Where Does It Come from and Where Might It Lead in the Case of Radioactive Releases to the Environment », in AIEA, *Proceedings of an International Atomic Energy Agency Symposium on the Environmental Impact of Radioactive Releases*, Vienne, document IAEA-SM-339/195.
59. Résolution 62/30 de l'Assemblée générale des Nations Unies du 5 décembre 2007, document A/RES/62/30, 10 janvier 2008.
60. Résolution du Parlement européen du 22 mai 2008 sur les armes contenant de l'uranium (appauvri) et leurs effets sur la santé humaine et l'environnement – Vers une interdiction mondiale de l'usage de ces armes, document P6\_TA(2008)0233.