

métal	symbole	masse volumique g/cm ³	fusion °C	ébullition °C	dureté Wickers	abondance mg/Kg ou ppm	prix relatif
tantale	⁷³ Ta	16,61	3 010	5 440	200	2,0	10
uranium	⁹² U	18,95	1 130	3 850	250	2,7	150
tungstène	⁷⁴ W	19,30	3 400	5 700	500	1,25	3
or	⁷⁹ Au	19,32	1 060	2 950	60	0,004	350
platine	⁷⁸ Pt	21,45	1 770	3 830	100	0,005	400
iridium	⁷⁷ Ir	22,42	2 440	4 400	650	0,001	500
osmium	⁷⁶ Os	22,57	3 030	5 010	1 000	0,001 5	900

Tableau 1 Caractéristiques de quelques métaux lourds rangés par densité croissante.

caractéristiques⁴ de quelques métaux particulièrement denses. Pour la résistance mécanique on a choisi (arbitrairement) la dureté Wickers. Pour le prix, et parce qu'il était facilement accessible, on a donné le prix "matériaux pour laboratoire" (Goodfellow) et pour de petites quantités. Une partie de ce prix vient de la mise en œuvre, et celle-ci est très différente pour de grandes quantités. Cette colonne prix est donc à considérer avec beaucoup de réserve, même comme indicatif des valeurs relatives. On a indiqué aussi l'abondance de chaque métal dans la croûte terrestre.

Si on avait à choisir avec le peu de connaissances militaires que nous avons, on éliminerait l'or et le platine trop mous, le tantale un peu plus dur mais moins dense, malgré son prix modéré, l'iridium et l'osmium trop chers. Il resterait le tungstène, très bon sur toute la ligne⁵ et à un prix défiant toute concurrence, et, assez loin derrière, l'uranium, dont les qualités mécaniques sont moins bonnes, et à supposer que son prix de gros puisse redevenir compétitif⁶ : il est assez abondant dans la croûte terrestre. De nouveau donc : pourquoi choisir l'uranium? et pourquoi appauvri?

2 On choisit probablement l'uranium appauvri car c'est un sous-produit bon marché de l'industrie nucléaire.

L'uranium naturel comporte essentiellement deux isotopes⁷ mais l'un est très largement dominant : l'²³⁸U qu'on trouve à 99,3 %. C'est pourtant l'autre, l'²³⁵U (0,7 %) qui donne sa notoriété à l'uranium, non pour sa radioactivité mais parce qu'il est fissile : soumis à un bombardement de neutrons, il fissionne en produisant d'une part de l'énergie - c'est ce qui est recherché- d'autre part des neutrons. Ce sont ces neutrons qui peuvent amorcer la réaction en chaîne à l'œuvre dans les centrales nucléaires... et dans les bombes. C'est l'²³⁵U qui est

- Un élément, symbole U, numéro atomique Z=92.
- Des isotopes, ²¹⁸U à ²⁴¹U, tous radioactifs.
- Uranium naturel, sur Terre, seulement trois isotopes : ²³⁸U, ²³⁵U, (²³⁴U).
- L'un d'entre eux, ²³⁸U, le plus abondant, est la tête d'une famille radioactive qui "descend" jusqu'au plomb (²⁰⁶Pb).
- L'uranium est pyrophorique: il s'enflamme spontanément à l'air.

État civil de l'uranium (voir annexe A).

le "combustible" nucléaire, que ce combustible soit pur ou reste plus ou moins dilué dans son compère ²³⁸U. Dans les bombes, l'amorçage d'une réaction en chaîne dans un ensemble compact nécessite un enrichissement presque total du combustible en ²³⁵U (aujourd'hui, pour les bombes, on "utilise" essentiellement ²³⁹Pu, on en reparlera plus loin). Les

4. Voir par exemple, <http://www.webelements.com/>.

5. Ce choix ne serait clairement pas stupide, il a été fait dans le passé pour les pénétrateurs anti-chars avant l'uranium, il pourrait aussi être le choix de l'avenir -celui des armes- puisque, selon *The Wall Street Journal*, cité par 'Le Courrier international' de nov. 99, dans une note intitulée ' la mort verte', ... *L'armée américaine planche actuellement sur des projectiles "propres", aussi meurtriers que des balles traditionnelles, mais respectueux de l'environnement. Le plomb y est remplacé par du tungstène. La balle verte devrait être prête en l'an 2003.* On devrait cependant faire remarquer au Wall Street Journal que le tungstène est comme le plomb (et comme l'uranium) un métal lourd toxique. Il n'est par contre pas pyrophorique comme l'uranium.

6. On trouverait ainsi tungstène et uranium naturel dans les mêmes gammes de prix de gros ce qui est bien loin du rapport des valeurs des prix de détail du métal. Les cours des matières premières sont soumis à de très larges variations. Ainsi, le cours de la livre(!) d'oxyde U₃O₈ (naturel) a varié de 6 à 45 dollars, elle est aujourd'hui à ≈ 10 dollars.

7. Essentiellement en masse, car un troisième isotope est présent, ²³⁴U, très peu abondant avec seulement 0,0055% en masse, mais dont on devra plus loin considérer la radioactivité (tous ces isotopes sont radioactifs à vie longue).

centrales de la filière graphite-gaz (française), par contre, ont fonctionné à l'uranium naturel malgré la grande dilution de l'élément fissile, mais aujourd'hui, la plupart des centrales fonctionnent à l'uranium faiblement enrichi (on passe typiquement de 0,7 à 3 ou 4%, beaucoup moins enrichi donc que pour les bombes ou même que pour les réacteurs embarqués où on atteint 95%).

Il faut donc des usines de séparation isotopique qui enrichissent l'uranium en sa composante fissile ^{235}U . Mais qui dit enrichissement des uns dit appauvrissement des autres. D'où sinon tirerait-on ^{235}U ? Une usine idéale qui séparerait complètement les deux isotopes fabriquerait 1 tonne de combustible enrichi à 3,5% à partir de 5 tonnes d'uranium naturel et laisserait 4 tonnes de "déchet" d'uranium ^{238}U pur. Les usines ne sont pas idéales : on produit un peu moins d'une tonne d'uranium à 3,5% et un peu plus de 4 tonnes d'un déchet dans lequel il reste un peu de ^{235}U dans l' ^{238}U , c'est l'uranium dit appauvri. Typiquement, on n'obtiendra que 0,75 tonne d'uranium enrichi (à 3,5% d' ^{235}U) et 4,25 tonnes d'uranium appauvri (à 0,2% d' ^{235}U).

L'uranium appauvri ou sa composante essentielle ^{238}U sont-ils vraiment des déchets? Notons d'abord que pour toute autre utilisation que la fission (chimie ou physique autre que nucléaire), uranium naturel ou appauvri ou ^{238}U pur, c'est la même chose. Mais il se trouve que la production d'énergie et donc la fission constitue l'utilisation dominante de l'uranium. On arriverait ainsi à la conclusion que l'uranium appauvri est en effet un déchet mais il faut cependant encore un détour. ^{238}U est en effet dit "fertile" : dans tout réacteur, il est transformé en élément fissile dans la séquence suivante : $^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U}(\beta^-) \rightarrow ^{239}\text{Np}(\beta^-) \rightarrow ^{239}\text{Pu}$ (fissile),

Dans la filière des surrégénérateurs, il est ainsi produit plus de matière fissile qu'il n'en est consommé. C'est comme si ^{238}U était lui-même brûlé. Cette filière, celle de Phénix ou de SuperPhénix a été abandonnée et l'uranium appauvri est bien un déchet⁸ qu'on peut se procurer pour pas cher⁹... et peut-être moins cher même que le tungstène au prix pourtant si attractif. Tout s'explique donc : les militaires peuvent *disposer* d'un matériau dense et pas cher. Mais il y a pourtant un problème, c'est que, contrairement au tungstène, l'uranium est radioactif et la *disposition* de ce matériau va peut-être poser quelques problèmes. Indiquons déjà ici ce qu'on trouve¹⁰ dans le "Handbook of Chemistry and Physics" :

L'uranium et ses composés sont hautement toxiques aussi bien d'un point de vue chimique que d'un point de vue radiologique.

Ici, nous nous intéresserons essentiellement à la physique, mais nous ne pouvons pas ignorer la toxicité chimique pour laquelle quelques éléments d'information seront donnés plus loin.

Si l'hypothèse a été émise ici que ce sont des raisons économiques qui ont conduit au choix de l'uranium en remplacement du tungstène utilisé précédemment, on se doit de rapporter l'échange suivant entre une rapporteure d'une Commission parlementaire de Défense nationale¹¹ et un haut responsable de la DGA (Délégation générale pour l'Armement) :

Mme la co-rapporteure: *Pouvez vous me confirmer que les obus à base d'uranium sont plus chers que les obus à base de tungstène?*

M. l'Ingénieur en chef: *Je vous le confirme.*

Pour ce dernier donc, c'est pour un avantage fonctionnel certain que l'uranium a été choisi. Les éléments d'information que nous avons donnés plus hauts restent inchangés.

8. Une faible partie de ce matériau est cependant réutilisée avec le plutonium pour fabriquer le combustible MOX.

9. Les stocks d'uranium appauvri sont considérables, plus de 500 000 tonnes dans le monde. Même si ce déchet reste un matériau potentiel pour une utilisation future pour les surrégénérateurs, il se négocie aujourd'hui comme un déchet.

10. Page 4-32 dans la 76^{ième} édition (1995-96), mais déjà aussi page B-144 dans la 46^{ième} édition (1965-66).

11. Guerre du Golfe : Vérité sur un conflit. Document No 3055 de 2001, tome II, page 185.

Concentration massique de l'uranium en parties par million (ppm), soit des $\mu\text{g/g}$ ou des g/tonnes .

Minerai	1 000
Écorce terrestre	3
Eau de mer	0,003
Corps humain	0,001
Système solaire	0,001
Eau de rivière	0,000 040

Toutes ces valeurs sont sujettes à de grandes variations.

L'uranium en quantités.

3 Uranium, uranium naturel, appauvri, ^{238}U , ^{235}U : quelles radioactivités?

3.1 Quelques généralités indispensables.

Les éléments radioactifs lourds se succèdent dans des chaînes souvent très longues et celle de l' ^{238}U justement conduit jusqu'à ^{206}Pb avec la perte de 32 unités de masse et de 10 charges et la libération au total de plus de 50MeV d'énergie par noyau initial. Cette chaîne passe par 13 noyaux intermédiaires¹² (certains comme le radium ou le radon sont célèbres) dont les durées de vie moyenne s'étalent de 164 μs pour ^{214}Po à 245 000 ans pour ^{234}U . L' ^{238}U disparaît donc petit à petit au travers de cette chaîne pour se transformer en plomb 206. Entièrement, à la fin, mais c'est long, des dizaines de milliards d'années.

Dans la nature, et par exemple dans un minerai non exploité, les différents éléments de la chaîne ou les différents isotopes en jeu ne sont pas séparés et alors, tous les constituants de la chaîne sont dans des proportions fixes correspondant à l'équilibre radioactif de la chaîne. Et ils le restent à chaque instant au cours de cette longue évolution. Quel est cet équilibre?

constituant de la chaîne	^{238}U $_{92}^{238}\text{U}$	^{234}U $_{92}^{234}\text{U}$	^{226}Ra $_{88}^{226}\text{Ra}$	^{210}Pb $_{82}^{210}\text{Pb}$	^{210}Po $_{84}^{210}\text{Po}$	^{222}Rn $_{86}^{222}\text{Rn}$	^{214}Bi $_{83}^{214}\text{Bi}$	^{214}Po $_{84}^{214}\text{Po}$
période	4,47 milliards d'années	245 000 ans	1 600 ans	22,3 ans	138 jours	3,82 jours	19,9 minutes	164 micro-secondes
quantité à l'équilibre	2,9 kg	0,16 g	1 mg	13 μg	219 ng	6,4 ng	22,5 pg soit $63 \cdot 10^9$ atomes	8 700 atomes
activité	37 millions de becquerels, soit 1 millicurie, chacun							

tableau 2 La relation masse-période dans une chaîne à l'équilibre.

Pour chaque élément, il y a autant de peuplement par décroissance du parent immédiat que de dépeuplement par décroissance vers le fils, ces nombres étant tous égaux au flux de la source, l'activité de l'aïeul commun à vie longue, ici l' ^{238}U . Insistons donc sur le fait qu'à l'équilibre, les *activités* des constituants de la chaîne mesurées en becquerel (une désintégration par seconde) ou en curie (1 curie correspond à l'activité de 1 gramme de radium, soit $37 \cdot 10^9$ becquerel) sont toutes *égales* et décroissent exponentiellement avec la période de l'élément de tête, ici 4,4 milliards d'années pour ^{238}U . Les *quantités* des constituants de la chaîne au contraire sont très *différentes*. Elles sont en fait proportionnelles à la période des éléments. On a rassemblé dans le tableau 2 ci-dessus les quantités de quelques-uns des éléments de la chaîne qui échantillonnent les périodes rencontrées. On a choisi l'activité qui correspond à 1 mg de radium, soit (par définition) 1 millicurie, pour tous les éléments. Attention, les éléments sont rangés par ordre de période décroissante et ne suivent pas l'ordre de la chaîne.

Ainsi on voit que l'activité de 8700 atomes de ^{214}Po est la même que celle de 2,9kg de ^{238}U , mais c'est ce dernier qui alimente toute la chaîne et maintient partout la même activité, la sienne, d'où son rôle très particulier pour nous.

3.2 Le rôle tout à fait vital de l' ^{238}U ... par sa radioactivité.

Il se trouve que par un détour singulier mais essentiel, nous devons la vie sur Terre à cet élément et plus précisément à cet isotope ^{238}U et plus précisément encore à sa radioactivité. La vie en effet, au moins telle que nous la connaissons, nécessite une atmosphère gazeuse, et sur notre planète, cette atmosphère a été introduite par l'activité volcanique éruptive. La composition de cette atmosphère a bien sûr été modifiée par l'activité biologique mais, encore aujourd'hui, l'activité volcanique, en introduisant dans l'atmosphère des composants minoritaires essentiels au maintien de l'effet de serre, contribue au maintien de la vie sur Terre. Mais l'activité volcanique à son tour nécessite le maintien d'une température interne élevée¹³ et donc l'apport permanent d'énergie. La Terre n'est pas comme une pomme (cuite) qui se

12. Ce sont, ^{234}Th (24,1 jours), ^{234}Pa (1,17 minutes), ^{234}U (245 000 ans), ^{230}Th (75 400 ans), ^{226}Ra (1 600 ans), ^{222}Rn (3,82 jours), ^{218}Po (3,10 minutes), ^{214}Pb (26,8 minutes), ^{214}Bi (19,9 minutes), ^{214}Po (164 microsecondes), ^{210}Pb (22,3 ans), ^{210}Bi (5,01 jours), ^{210}Po (138 jours), ^{206}Pb (stable).

13. Deux autres phénomènes font de l'activité centrale de notre planète un élément indispensable au maintien de la vie : d'une part cette activité provoque l'existence du champ magnétique terrestre qui nous protège des dégâts du vent solaire et d'autre part, elle entretient le mouvement des continents et contrebalance ainsi l'érosion qui emmène en permanence la matière des continents dans la mer.

refroidirait : elle serait froide depuis longtemps.. et nous avec! (Kelvin, au siècle dernier, était arrivé à un âge beaucoup trop faible de la Terre sur la base d'une telle évaluation). L'apport permanent d'énergie est celui de la radioactivité de ^{238}U et de ses descendants¹⁴, (il n'est donc pas tout à fait permanent puisqu'il s'éteint avec une durée de vie de 4,5 milliards d'années). On a vu plus haut que 50 MeV étaient ainsi libérés au cours de la descente de la chaîne. Ce chiffre peut se comparer à une énergie de fission typiquement autour de 200 MeV. Mais insistons sur le fait que la fission spontanée de ^{238}U comme celle d'ailleurs de son compagnon minoritaire ^{235}U utilisé dans les centrales a une probabilité extrêmement faible¹⁵ et ne joue donc aucun rôle dans la nature et dans le maintien en vie de notre planète. Mais nous nous sommes éloignés du sujet qui n'est pas la survie à long terme de l'humanité mais l'utilisation d'obus par une partie de l'humanité d'aujourd'hui contre une autre partie de cette humanité et les conséquences à moyen terme de cette utilisation. Car les conséquences à court terme sont connues et mêmes voulues : destructions de vies humaines et de matériel.

3.3 Mais qu'en est-il de la radioactivité de l'uranium appauvri?

C'est parce que nous sommes au cœur de la spécificité nucléaire que la réponse n'est pas complètement simple. Des éléments chimiques se transforment spontanément les uns dans les autres introduisant le paramètre "temps" dans les réponses aux questions qu'on se pose. Il faut donc être extrêmement précis sur ce dont on parle. On va distinguer "l'uranium dans la nature", "l'uranium naturel", "l'uranium appauvri", et pour chacun de ces derniers on devra distinguer le produit naissant (chimiquement pur) du produit vieilli (ici de quelques mois).

L'uranium dans la nature (la chaîne à l'équilibre) a été traité plus haut. On trouve donc 13 intermédiaires + 1 $^{238}\text{U} = 14 \times 1 \text{ mCi}$ pour 2,9 kg d' ^{238}U , quelle que soit la dilution de cet élément. Il faudrait ajouter celle de ^{235}U et de ses descendants, cependant, ^{235}U est 150 fois moins abondant pour une période 7 fois plus courte, l'activité de ^{235}U de même que celle de ses descendants est donc 20 fois plus faible que celle de la famille de l' ^{238}U et peut donc être négligée¹⁶. C'est encore plus vrai dans l'uranium appauvri.

Afin d'examiner les autres situations, on a précisé dans le tableau (3) ci-dessous le début de la chaîne, qui seul contient les deux isotopes de l'uranium, en indiquant les éléments, leur période¹⁷ et la principale radiation qui les relie. Pour les émissions β^- , on a indiqué l'énergie maximale de la principale composante.

$^{238}_{92}\text{U}$	α →	$^{234}_{90}\text{Th}$	β^- →	$^{234}_{91}\text{Pa}^*$	β^- →	$^{234}_{92}\text{U}$	α →	$^{230}_{90}\text{Th}$
	4,2 MeV		0,2 MeV		2,3 MeV		4,9 MeV	
4,45.10 ⁹ ans		24,1 jours		1,17 mn		245 000 ans		75 400 ans

tableau 3 Le début de la chaîne radioactive de l'uranium 238.

L'uranium naturel tel qu'il est extrait, résulte de traitements qui sélectionnent l'élément uranium (Z=92) à partir de ses propriétés chimiques. Avec les déchets sont donc éliminés tous les produits de la chaîne qui ne sont pas de l'uranium et, juste après sa fabrication, il ne reste donc que $^{238}_{92}\text{U}$ (99,3%), $^{235}_{92}\text{U}$ (0,7%), et ^{234}U . Ce dernier est en quantité pondérable très faible (0,16 g pour 2,9 kg soit $5,5 \cdot 10^{-3}\%$) mais rappelons que son activité est par contre la même que celle de $^{238}_{92}\text{U}$. On a donc au total, à ce moment là, une activité de 2 mCi pour 2,9 kg.

Pour **l'uranium appauvri**, la séparation isotopique qui visait $^{235}_{92}\text{U}$ et a affaibli sa concentration de 0,7 à 0,2% devrait être plus efficace encore pour $^{234}_{92}\text{U}$ qui est plus éloigné en masse de l' $^{238}_{92}\text{U}$ que l' $^{235}_{92}\text{U}$. On va supposer qu'il est complètement éliminé. On a donc alors comme unique activité celle de $^{238}_{92}\text{U}$ avec 1mCi/2,9kg.

Pour chacun des produits cependant, et dès leur fabrication, les isotopes radioactifs présents commencent à alimenter la chaîne détruite pour tendre à la recomposer à l'équilibre comme initialement. Pour un parent déjà à l'équilibre, il faut attendre plusieurs fois la période de l'élément considéré pour qu'il approche de sa concentration limite maximale¹⁸. Après seulement plusieurs mois (période de 24 jours), $^{234}_{90}\text{Th}$ et $^{234}_{91}\text{Pa}$ sont à l'équilibre. Pour l'uranium appauvri, cela s'arrête là, la chaîne est bloquée par les 245 000 ans de $^{234}_{92}\text{U}$. Pour l'uranium naturel, $^{234}_{92}\text{U}$ est présent

14. La justice veut qu'on mentionne un rôle équivalent pour ^{232}Th et ^{40}K .

15. Pour l'essentiel donc, la fission est un phénomène déclenché et entretenu dans les réacteurs par un flux de neutrons. La radioactivité, c'est à dire la désintégration des nucléides instables, est spontanée, que ces nucléides soient naturels ou artificiels.

16. Attention que ce n'est pas vrai pour le rayonnement gamma car comparée à celle de ^{238}U , chaque désintégration de ^{235}U est accompagnée de dix fois plus de ces rayonnements et d'énergie environ dix fois plus élevée.

17. Pour le protactinium, on a indiqué les données correspondant à l'état isomérique, principal intermédiaire de la chaîne, et noté Pa*.

18. Après dix périodes on est à un millième de cette limite.

avec sa concentration à l'équilibre inchangée lors de l'extraction chimique, mais la chaîne est bloquée par les 75 400 ans de $^{230}_{90}\text{Th}$.

On arrive donc au tableau (4) résumé suivant :

produit	activité en mCi pour 2,9 kg
uranium dans la nature	14 (toute la chaîne)
uranium naturel naissant	2 ($^{238}_{92}\text{U}$ et $^{234}_{92}\text{U}$)
uranium naturel stocké	4 ($^{238}_{92}\text{U}$, $^{234}_{92}\text{U}$, $^{234}_{90}\text{Th}$ et $^{234}_{91}\text{Pa}^*$)
uranium appauvri naissant	1 ($^{238}_{92}\text{U}$)
uranium appauvri stocké	3 ($^{238}_{92}\text{U}$, $^{234}_{90}\text{Th}$ et $^{234}_{91}\text{Pa}^*$)

tableau 4 L'activité de l'uranium dans différents états.

... où il apparaît que **l'uranium appauvri stocké n'est que faiblement moins radioactif que l'uranium naturel stocké**. Mais le nombre de désintégrations ne suffit pas, il faut examiner également la nature des rayonnements correspondants et le nombre de ces rayonnements. Les schémas de désintégrations sont complexes, ils comprennent de nombreuses branches, et à ces différentes branches peuvent correspondre des émissions multiples. Une transition gamma peut aussi avoir une probabilité importante d'être "convertie" en électron alors accompagné de l'émission de nombreux rayons X. L'émission bêta comporte un spectre d'électrons allant de 0 à l'énergie maximale, elle est accompagnée de l'émission de neutrinos indétectables et donc aussi sans danger.

On a décrit dans le tableau (5) ci-dessous les émissions les plus importantes et on a groupé des énergies voisines pour ne pas allonger des listes inutilement : on veut une représentation fidèle mais approximative. On a donné le parcours dans l'eau comme indicatif de la pénétration dans les cellules ou du blindage par des éléments légers. On donne aussi le parcours dans l'uranium pour examiner le comportement d'une masse plus ou moins compacte d'uranium.

repère	rayonnement (nature)	énergie (MeV)	origine	parcours dans l'eau	parcours dans l'uranium	abondance relative(%) dans le bloc	abondance relative(%) hors du bloc	repère
1	alpha	4,2	U	32 μm	7,9 μm	100	0,04	1
2	électrons(-)	0,03	Th(γc)	17 μm	2,2 μm	21	0,00	2
3	électrons(-)	0,07	Pa(γc)	75 μm	9 μm	16	0,01	3
4	électrons(-)	0 à 0,1	Th(β)	41 μm^*	5,3 μm^*	30	0,01	4
5	électrons(-)	0 à 0,2	Th(β)	140 μm^*	16 μm^*	70	0,06	5
6	électrons(-)	0 à 2,3	Pa(β)	0,46 cm *	420 μm^*	100	2,36	6
7	X	0,015	Th+Pa	0,4 cm **	5,3 μm^{**}	19	0,01	7
8	gamma	0,06	Pa	3,3 cm **	53 μm^{**}	5	0,02	8
9	gamma(+X)	0,09	Pa	4 cm **	160 μm^{**}	8	0,10	9
						total=369	total=2,62	

% Abondance relative pour 100 désintégrations de ^{238}U .

γc Transition gamma convertie en électron.

* Pour l'émission bêta(β^-), on donne le parcours des électrons pour $E_{max}/2$.

** Pour l'émission X ou gamma il s'agit de la "demi-épaisseur", pour laquelle l'intensité est réduite de moitié.

tableau 5 Émissions les plus importantes pour l'uranium appauvri stocké.

L'abondance relative "dans le bloc" correspond à l'ensemble¹⁹ des émissions présentes, on ne se préoccupe pas de leur détectabilité; celle-ci est totale si le matériau est dispersé. Elle est réduite si le matériau est rassemblé en bloc compact. Il faut alors préciser la géométrie de ce bloc, et cela concerne la partie droite du tableau (5) qui sera commentée plus loin.

On remarquera que pour une désintégration de $^{238}_{92}\text{U}$ il y a émission, en moyenne, de 3,69 rayonnements divers avec une énergie totale de la chaîne (tronquée) de 6,74 MeV (on devrait soustraire l'énergie emportée par les neutrinos).

3.4 Les effets biologiques de cette radioactivité (voir aussi l'annexe B).

Le danger biologique peut relever de l'irradiation (elle décroît et s'interrompt si on s'éloigne suffisamment de la source) ou de la contamination qui résulte de l'absorption par ingestion ou inhalation de produit radioactif. Avec la

19. Il ne faut pas s'étonner que ce total dépasse 100%. Cela signifie que chaque désintégration (alpha) initiale de ^{238}U est accompagnée de 2 ou 3 (en moyenne 2,69) autres émissions.

contamination apparaît le risque chimique. Un bloc compact de matériau radioactif n'est susceptible de provoquer que de l'irradiation, le même matériau dissout ou réduit en poussières est un contaminant potentiel. C'est la contamination et le risque chimique qui l'accompagne qui créent le danger le plus manifeste dans le problème qui nous concerne.

Le danger biologique d'un élément radioactif dépend bien sûr des quantités présentes de cet élément et des caractéristiques physiques de ses rayonnements mais il dépend donc aussi de la nature du matériau qui le constitue ou qui le contient : bloc compact protégé ou poussières dispersées. Pour la contamination, il dépend aussi de façon déterminante de ses caractéristiques biologiques : combien de temps il reste dans le corps humain (si ce temps, sa "période biologique", est plus court que la période radioactive) et dans quel organe. Et ces caractéristiques, à leur tour dépendent et quelquefois radicalement de la taille des poussières et de l'état chimique dans lequel se présente l'élément radioactif.

Les quantités d'uranium seront connues dès que seront particularisées les caractéristiques de l'obus et nous discuterons surtout de la forme du matériau avant et après l'explosion.

Du point de vue des effets biologiques, on remarquera les rayons alpha de 4,2 MeV (repère 1). Ils sont très ionisants, énergiques et sont affectés d'un facteur de qualité (destructrice) élevé. Si ces effets ne se manifestent pas en contamination externe (leur parcours est trop faible, et quand ils ne sont pas simplement arrêtés dans l'air, ils ne traversent pas la peau) ils sont redoutables en contamination interne, ingestion ou inhalation. Les électrons énergiques (repère 6) sont beaucoup moins ionisants mais sont par contre pénétrants. Ils sont aussi abondants que les particules alpha. On remarquera également les rayons gamma de 90keV pas très abondants mais plus pénétrants encore et qu'on retrouvera toujours derrière un blindage léger qui arrêterait le reste.

On peut chiffrer la radioactivité et les rayonnements, mais peut-on chiffrer le danger²⁰? La réponse est complexe, on en a vu plus haut les raisons, et pour une même activité (les becquerels), la dose (les sieverts) qui mesure le danger ou les dégâts peut varier de un à un million selon le radionucléide. Ainsi, on tolère beaucoup plus de becquerels de tritium que de plutonium.

Des commissions nationales et internationales travaillent depuis des décennies sur ces questions et intègrent au fur et à mesure les nouveaux résultats issus d'expériences, de statistiques, d'accidents. Elles ont également intégré le sort des victimes des bombardements de Hiroshima et Nagasaki. De manière directe ou indirecte, les études menées ont abouti pour chaque radioélément à la définition de "limites admissibles", différentes pour le public et les travailleurs "habilités". Elles sont admissibles, cela ne veut pas strictement dire sans danger. Cela ne veut pas non plus dire que le danger pour ces limites a été démontré²¹. Elles sont sévères donc. Disons qu'avec ces limites les effets, toujours stochastiques (probabilités d'apparition d'effets et non pas effets plus ou moins graves), sont comparables à ceux qui résultent de l'exposition artificielle moyenne (essentiellement les radiographies), ou comparables à ceux qui résultent de l'exposition naturelle moyenne (rayonnement du sol, radon des roches ou du béton, rayons cosmiques), toutes deux soumises à de très grandes variations.

Pour chiffrer ces limites, deux **sources réglementaires françaises** sont nécessaires, le décret 86-1103 du 02/10/86 et le décret 88-521 du 18/04/88. On y ajoutera une **source européenne**, la Directive 96-29 du 29/06/96, document L159 (euratom), J.O. des communautés européennes. Il faut enfin le Document 72 (session de 1995) de la **Commission Internationale de Protection Radiobiologique (CIPR)**. Annals of the ICRP 26 (1) 1996. On peut encore y ajouter un **livre d'utilisation plus directe** : Radionucléides et Radioprotection, par D. Delacroix, J.P. Guerre et P. Leblanc, CEA Saclay, 1998.

Avec des normes multiples et qui évoluent, des connaissances qui progressent pour un problème complexe et des circonstances fortement diversifiées, il est difficile en seulement quelques chiffres de ne pas prêter à contestation. Il semble cependant nécessaire de ne donner que quelques chiffres afin que ce texte reste synthétique.

Pour le public²², et concernant ²³⁸U seul, on évalue à :

- limite annuelle d'inhalation : 500 à 5 000 Bq,
- limite annuelle d'ingestion : 20 000 à 200 000 Bq.

Pour les poussières donnons encore ce chiffre utilisé dans les laboratoires. Pour une contamination de surface dite "non fixée"²³, on tolère une activité en ²³⁸U de 0,1 becquerel par cm² (dix fois plus si la contamination est fixée).

20. Un élément de comparaison qui est intéressant mais qui ne clôt pas du tout le sujet : la radioactivité d'un être humain adulte est d'environ 6 000 Bq.

21. Ces limites sont établies avec le modèle dit "linéaire sans seuil" le plus défavorable : on pense plutôt aujourd'hui qu'il existe un seuil, une limite en dessous de laquelle il n'y a aucun effet, même statistique.

22. Pour les travailleurs habilités les chiffres sont 3 à 10 fois plus élevés.

23. Non fixée par un vernis ou une résine. Une contamination qui peut se libérer par contact ou par effet du vent.

On remarquera combien la limite d'inhalation est faible. Ces chiffres seront comparés plus loin aux évaluations concernant les obus.

Avant de poursuivre sur la physique, donnons ici quelques informations concernant la toxicité chimique de l'uranium. On trouvera une documentation sur ce sujet dans :

“ Toxicologie moléculaire. Notions de Biologie et de Chimie appliquées.” André Picot et Jean-Marie Louis. Librairie Tec-Doc Lavoisier (2000).

Pour chaque composé, ici les différents oxydes d'uranium, on considère un paramètre, la transférabilité, la capacité qu'a ce composé de passer dans les fluides du corps à partir d'une "porte", ingestion ou inhalation. On considère parallèlement la rétention au niveau des portes. On examine enfin le sort du produit une fois solubilisé dans le sang et les organes cibles qu'il va attaquer. Les composés fortement transférables de l'uranium ont un temps de séjour faible dans le corps et une forte toxicité chimique du type de celle d'un métal lourd comme le plomb. Les organes cibles sont les reins, les tissus osseux, mais aussi les tissus nerveux. Les composés faiblement transférables (insolubles) ont uniquement une radiotoxicité. Ils restent longtemps dans le corps (une période biologique de 1 ou 2 ans) mais les poumons deviennent également une cible pour ces composés.

Faut-il préciser que la toxicité chimique ne peut que s'ajouter à la radiotoxicité. Elle peut cependant devenir déterminante pour l'intoxication aigüe : une absorption d'une quantité même modérée mais en un temps très court. La toxicité chimique est indépendante de l'isotope. Son importance relative est donc la plus grande pour l'isotope à vie la plus longue ^{238}U (qui est aussi le plus abondant).

Dans un rapport de 1995²⁴, on trouve pour l'inhalation aigüe d'uranium "soluble" (dans les liquides physiologiques) une limite à 8 mg et 40 mg (soit 100 et 500 Bq) pour l'observation de troubles rénaux respectivement temporaires et permanents mais résultant de la toxicité chimique de l'uranium²⁵.

4 La radioactivité de l'obus.

Il faut maintenant particulariser l'obus dans ses dimensions et sa forme.

Dans l'obus "crayon" de 30 mm, l'essentiel du volume ($\simeq 200\text{ cm}^3$) est occupé par les explosifs et l'enveloppe mécanique puisque la charge de 300 g d'uranium n'occupe qu'un volume de $\simeq 17\text{ cm}^3$. On va donner une forme oblongue à cette charge et par exemple, pour mettre des chiffres, un cylindre de 1 cm de rayon et de 4 cm de long et terminé par les deux demi-sphères correspondantes. Soit un volume de $16,75\text{ cm}^3$ et une surface de $37,7\text{ cm}^2$, on utilisera ces valeurs un peu plus loin.

Plus précisément, ce bloc pèse 317 g et a une activité totale en ^{238}U de 4.10^6 Becquerels, soit $110\text{ }\mu\text{Ci}$. Il y a la même activité en ^{234}Th et en ^{234}Pa soit au total 12 MBq ($0,33\text{ mCi}$). C'est un chiffre tout à fait conséquent mais les conséquences de cette activité ou même simplement les possibilités d'observation de cette activité vont être radicalement différentes selon que l'obus est stocké dans un hangar ou dans la soute d'un hélicoptère ou bien qu'il est "utilisé".

4.1 L'obus avant explosion.

Pour le bloc de métal, avant utilisation donc, une partie des rayonnements va être arrêtée par le métal environnant et ne va même pas être détectable. Cet "auto-blindage" va diminuer l'activité apparente.

Reprenons dans le tableau (5) les parcours des différents rayonnements dans l'uranium. Pour l'observateur (nécessairement extérieur!) du bloc d'uranium, seule va être active une zone du métal à la surface du solide et dont l'épaisseur totale correspond aux parcours indiqués, une peau active en quelque sorte²⁶. Le rapport de l'activité détectable à l'activité totale est dans le rapport du volume de cette peau (un peu plus précisément définie²⁷) au volume total.

24. Bioassay Program for Uranium, Health Physics Society et ANSI, cité dans RAND/1999 A review of the scientific Literature As it Pertains To Gulf War Illnesses, Vol 7 Depleted Uranium, MR-1018/7-OSD, 1999, RAND, Rand Home Page.

25. L'ingestion de quantités bien plus importantes d'uranium *insoluble* n'aura par contre pas d'effets. L'uranium dans les états d'oxydation 3+ ou 4+ (UO_2) est peu ou pas soluble.

26. Encore les rayonnements chargés (alpha, bêta, électrons) qui en sortent auront-ils en moyenne une énergie plus faible que celle indiquée dans le tableau.

27. Pour des noyaux émetteurs de particules chargées, l'activité apparente en dehors du bloc décroît depuis la surface (où la moitié des particules sort) jusqu'à la profondeur maximale -le parcours-. On montre que l'épaisseur de peau équivalente à pleine activité est égale au quart (1/4) du parcours. Pour les rayons X ou gamma, le "parcours" équivalent vaut $d_{1/2}/\text{Log}(2)$, où $d_{1/2}$ est la demi-épaisseur. L'épaisseur active vaut là aussi le quart de ce "parcours".

L'abondance relative observée hors du bloc des différents rayonnements ainsi atténués est indiquée dans la colonne droite du tableau (5).

Le facteur de réduction est d'autant plus grand que le parcours est petit. Il est de 2 200 pour les rayons alpha (repère 1) mais seulement de 44 pour les électrons de 1,1MeV (repère 6). Au total l'activité passe de 369% (voir note 17) à 2,62% soit un facteur moyen de réduction de 140.

Pour illustrer plus clairement l'effet de cet auto-blindage, on a représenté sur la figure 2 l'activité spécifique **apparente** du rayonnement X de 15 keV, le plus abondant, pour un bloc sphérique d'uranium (^{238}U pur) en fonction du rayon de ce bloc. Sans auto-blindage, activité et activité apparente sont identiques, celle de la sphère de petit rayon. Pour une sphère de 300 g, le facteur de réduction est de $\simeq 5\,000$, on aurait un facteur comparable pour les redoutables rayons alpha.

L'activité du cylindre nu est donc considérablement réduite : on va passer d'un rayonnement total de $\simeq 400\ \mu\text{Ci}$ à seulement $3\ \mu\text{Ci}$! Mais ce cylindre est entouré des matériaux (explosifs avant explosion) et d'une enveloppe métallique résistante qui vont arrêter TOUS les rayonnements chargés. Seule sera probablement détectable une activité résiduelle gamma de 95 keV, mais inoffensive du fait de son intensité extrêmement réduite, même à son voisinage immédiat²⁸. La conclusion est favorable aux militaires : l'obus ne doit pas nuire à celui qui le tire. Mais qu'en est-il de ceux qui le reçoivent?

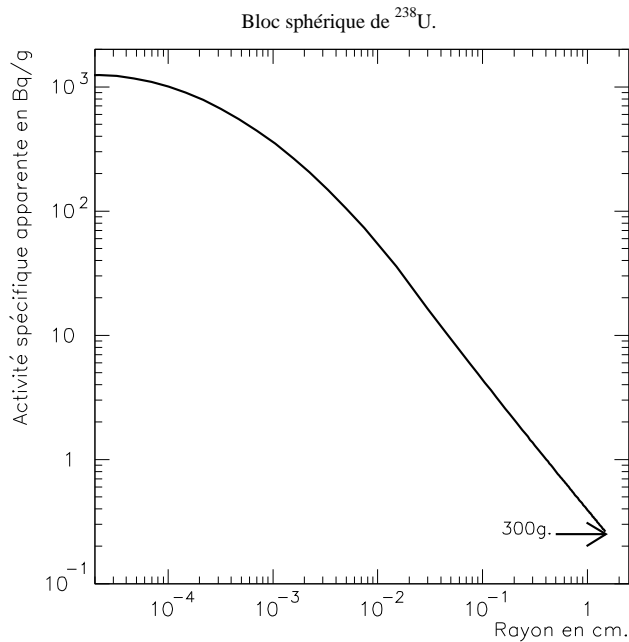


Figure 2 Activité apparente pour les rayons gamma (ou X) de 15 keV issus d'un bloc sphérique d'uranium en fonction du rayon de ce bloc.

4.2 L'uranium après son utilisation.

L'obus tiré aboutit dans une casemate, dans un char, dans un abri ou il est perdu dans un tir "inutile" dans la campagne. Les charges explosives qui accompagnent la masse d'uranium se déclenchent et provoquent une onde de choc destructrice et une élévation de température qui permettent le percement des blindages par la masse dense et rapide de l'uranium mais qui, bien sûr, ne laissent pas le projectile intact. L'obus termine sa trajectoire à l'intérieur de l'objectif où une autre explosion destructrice a lieu, probablement un incendie est provoqué, ainsi que d'autres explosions. L'uranium est un métal pyrophorique : finement divisé, il s'enflamme spontanément à l'air. Mais chauffé suffisamment, même en bloc il s'enflamme. On a même dit que cette propriété pouvait être à l'origine du remplacement du tungstène non pyrophorique par l'uranium : le pénétrateur enflammé, suite à son échauffement dans la traversée du blindage, provoque l'incendie à l'intérieur du char et sa destruction.

On va supposer que seulement 30%²⁹ de la masse métallique est dispersée en fines particules métalliques qui s'oxydent rapidement dans ce qui peut rester d'air. On va supposer que le reste se maintient en bloc.

Pour le bloc, il n'y a plus la protection qui l'entourait dans l'obus et on va retrouver un danger d'irradiation. Il ne sera pas très important cependant compte tenu de l'auto-blindage qu'on a évoqué plus haut et qui provient du fait que les radiations en jeu sont relativement peu pénétrantes. Attention cependant, qu'il ne faut pas collectionner ces objets ni simplement rester à proximité. Il ne faut pas faire un presse-papier de ce bloc de métal incroyablement dense.

Mais le danger important est celui de contamination par la poussière dispersée. Les facteurs de réduction dus à l'auto-blindage ne jouent absolument plus et pour chacun de ces obus on retrouve le tiers de l'activité totale, soit le tiers de environ 4 Mégabecquerels d'uranium et de ses premiers descendants, dispersés en poussière dans la nature.

28. En fait, en rapport avec ce faible rayonnement pour l'émission gamma du bloc de ^{238}U , il ne faudrait plus négliger la contribution du faible pourcentage de ^{235}U , malgré sa forte atténuation, atténuation moins grande cependant que celle de ^{238}U , (voir la note 14 à ce sujet).

29. Cette proportion varie de 10% à 60% selon le matériau touché.

L'émission des particules alpha de 4 MeV est particulièrement efficace, on l'a noté plus haut. Ils sont redoutables en contamination interne, ingestion ou inhalation, ce que la forme de poussière rend particulièrement probable.

Pour qui ces dangers? Bien sûr pas pour le tankiste dispersé en lambeaux carbonisés depuis longtemps. Mais, bien plus tard, pour les gens, les enfants qui iront visiter les carcasses abandonnées, peut-être y rechercher ces morceaux de métal incroyablement lourd, pour les ouvriers qui iront récupérer les carcasses ou nettoyer le terrain, le rendre à une utilisation civile.

Pour combien de temps ce danger? La seule limitation viendra de la dispersion des poussières, de la dilution des produits solubles, et de la récupération des blocs restants. L'érosion du sol pourra contribuer à une décontamination locale, mais au prix de concentrations dangereuses dans d'autres lieux.

Reprenons les évaluations précédentes concernant les "limites admissibles" et ne tenant compte que du seul ²³⁸U (à l'exclusion des descendants donc). Pour chaque obus, la fraction de sa charge dispersée en poussière a une activité de 1,33 MBq (37 μ Ci). Bien sûr que seule une faible fraction de cette activité risque effectivement d'être ingérée ou inhalée. Cependant, l'activité des poussières d'un seul obus correspond à :

- 300 à 3 000 fois la limite annuelle pour l'inhalation,
- 7 à 70 fois la limite annuelle pour l'ingestion,
- enfin, les poussières de ce seul obus doivent être étalées uniformément sur 1300 m² pour ne pas dépasser la limite admise de contamination de surface dans un laboratoire.

Comment penser que les zones où ces armes ont été utilisées massivement ne présentent aucun danger pour ceux qui y vivent maintenant, ou simplement pour ceux qui s'y promènent³⁰? Où sont passées ces poussières contaminantes?

Des enquêtes de santé et des mesures sur le terrain sont seules à même de répondre à ces questions.

On sait que ce type d'obus est tiré en rafales par les avions et on a donné pour la guerre du Golfe le chiffre considérable de 900 000 tirs. Avec les autres types d'obus, ce sont environ 300 tonnes d'uranium appauvri qui auraient été effectivement envoyées sur le terrain³¹, 30 tonnes en Yougoslavie. Qu'on juge.

4.3 Des mesures significatives.

Il est utile de rapporter les résultats passés inaperçus et pourtant assez surprenants de mesures tout à fait significatives effectuées sur des populations exposées. À la demande de la BBC écossaise³², des études ont été effectuées sur des habitants des Balkans. Ces habitants (volontaires) qui vivent ou ont vécu dans des régions où l'uranium appauvri a été utilisé ont été choisis pour avoir été soumis à des risques de contamination par ingestion ou par inhalation. Des recherches d'uranium appauvri ont été effectuées sur des échantillons d'urine de ces patients et la charge d'uranium présente dans leur squelette a été évaluée à partir de deux modèles reposant sur des hypothèses différentes d'incorporation. Sur cet échantillon de 17 personnes (il comprenait en fait l'un des membres de la BBC), deux résultats ont été donnés: i) *tous* les cas présentaient une présence d'uranium appauvri dans l'uranium (évaluée à partir du rapport isotopique 235/238) dans des proportions allant de 17% à 87% ii) les évaluations de dose sur le squelette provenant de ce contaminant ont été évaluées plus faibles que celles provenant de radionuclides naturels (uranium et autres).

Le point ii) plutôt rassurant mais reposant sur un modèle ne devrait pas cacher l'importance du point i). Car voilà un succès bien surprenant pour un échantillonnage: sur 17 cas, 17 succès dans la détection d'uranium appauvri. Cela nous semble devoir appeler deux prolongements à cette étude: 1) étendre le nombre de personnes prospectées pour

30. L'uranium appauvri a été, est peut-être toujours, utilisé dans quelques applications civiles, probablement pour les mêmes raisons, densité élevée, faible prix. On n'a jamais rapporté de problème avec les quilles de voiliers de compétition. Il n'en est pas de même avec les contrepois de dérive de Boing 747. Il arrive qu'un avion s'écrase et qu'il prenne feu. C'est arrivé à Amsterdam en 1992 pour un cargo 747 d'El Al. Voici les conclusions de la commission d'enquête qui a rapporté 7 ans après (Avril 1999): [The Commission concludes] that it is unlikely that big group of citizens and rescue workers have contracted a uranium poisoning. . . [but] the Commission explicitly states that it cannot be excluded that in specific circumstances, some individuals have inhaled that much respirable uranium oxide particles that a contamination has taken place. Autrement dit, (avec la combustion de quelques dizaines de kg) on ne devrait pas avoir de problème pour toute une population mais on ne peut exclure un certain nombre (inconnu bien évidemment) de contaminations individuelles. Et qu'en est-il des effets à long terme sur la population? La commission ne répond pas vraiment à cela.

31. Dispersées dans 300 000 tonnes de terre, on retourne à la concentration d'un minerai, mais il faut 100 millions de tonnes pour retrouver la concentration moyenne de la croûte terrestre.

32. Depleted Uranium in Balkan Residents. Report prepared for D.MacLeod of BBC Scotland by: Prof. N.Priest, School of Health, Biological and Environmental Sciences, Middlesex University and Prof. M.Thirlwell Department of Geology, Royal Holloway and Bedford College, University of London.

enfin trouver des cas négatifs, bref améliorer la connaissance de la distribution et ses corrélations avec les paramètres géographiques, historiques et sociaux connus. 2) au moins pour ces 17 premiers cas, approfondir les mesures physiques ou bio-physiques pour contraindre plus fortement les modèles d'évaluation de charge corporelle et de leurs conséquences.

Mais puisque l'uranium appauvri a de nouveau été utilisé en Afghanistan et plus récemment encore en Irak, il est indispensable d'engager le plus tôt possible une campagne de mesures avec les populations potentiellement contaminées. Les mesures sont techniquement plus aisées et d'autant plus faciles à interpréter qu'elles sont effectuées peu de temps après la contamination.

5 D'autres inquiétudes?

Un élément d'information doit être ajouté au dossier, c'est la présence dans l'uranium appauvri utilisé pour les obus de l'isotope ^{236}U . Sa proportion est très faible (0.001 à 0.010 %) et l'activité correspondante, avec une période de $2,3.10^7$ ans, est petite ou négligeable. Le problème vient de ce que cet isotope, absent³³ de l'uranium naturel, n'est produit que dans les réacteurs, et dans les réacteurs, on produit en même temps que ^{236}U des radionucléides bien plus actifs et radiotoxiques, comme les transuraniens et une partie des produits de fission. Qu'en est-il dans le matériau utilisé pour les obus?

Différentes sources concourent pour affirmer la présence de l'isotope ^{236}U dans l'uranium appauvri des obus. Elle a d'abord été mentionnée au cours d'une émission de télévision³⁴ dans l'intervention d'un médecin militaire américain, A. Durakovic. Ce médecin a confirmé cette déclaration par une intervention³⁵ dans un congrès à caractère scientifique. À partir de prélèvements effectués sur des anciens combattants de la Guerre du Golfe des analyses en spectrométrie de masse ont été effectuées. Une première conclusion de ces analyses, fondée sur l'observation d'une concentration en ^{235}U variant de 0,2 à 0,72 % selon les échantillons, est que, parmi ces soldats, quelques-uns ont été effectivement contaminés par les armes utilisées³⁶. La détection et la mesure de ^{236}U très peu abondant est moins incontestable.

La présence de cet isotope aujourd'hui partout reconnue (y compris en France) est également mentionnée dans des rapports américains sur les stocks d'uranium. Il est par exemple annoncé à 0,003% dans le rapport de Fetter et von Hippel (voir note 2) ou dans le rapport du "Army Environmental Policy Institut"³⁷.

Si d'une part, ^{236}U est bien présent dans l'uranium appauvri, et d'autre part, on ne trouve ^{236}U que dans le combustible usé, alors vient la question :

Pourquoi peut-on trouver des traces de combustible usé dans l'uranium appauvri?

C'est que le combustible usé, qu'il vienne d'un réacteur civil ou militaire (on verra plus loin pourquoi cette distinction), contient encore de l'isotope ^{235}U et il en contient à peu près autant que l'uranium naturel. L'uranium extrait de ce combustible usé est donc susceptible d'être soumis à un processus d'enrichissement/appauvrissement, nouvelle source d'**uranium appauvri** qu'on va dire **de deuxième génération** ou encore *l'uranium de retraitement appauvri*.

Les proportions des différents isotopes de l'uranium et leur évolution sont indiquées pour le cas du réacteur "civil", dans le tableau (6). Le combustible est enrichi mais reste longtemps dans le réacteur, il y est beaucoup brûlé car on cherche d'abord la production d'énergie, et c'est pourquoi on peut arriver au déchargement à des concentrations de ^{235}U voisines de celle du naturel. Dans le cas du réacteur "militaire", destiné d'abord à la production de plutonium, le combustible est de l'uranium naturel et reste très peu de temps dans le réacteur, on verra pourquoi plus loin, il est à peine brûlé. On reste à la concentration en ^{235}U voisine de celle de départ, c'est encore celle du naturel.

33. Rien ne peut échapper aux recherches de traces et, selon le cours sur la spectrométrie de masse du DEA C2R (Université Paris XI et al), on trouve en fait cet isotope avec une concentration estimée à environ 7.10^{-8} %.

34. *La Guerre Radioactive Secrète.*, une "90 minutes" préparée par Martin Meissonnier et son équipe pour Canal Plus et présentée le 24-02-00.

35. A. Durakovic, L. Dietz, P. Horan, communication S-75. Congrès de médecine nucléaire, Paris, 2-6 Sept. 2000. *Quantitative analysis of uranium isotopes in canadian, US, and british gulf war veterans*.

36. La composition isotopique de l'uranium de ces armes est confirmée avec l'analyse effectuée sur des fragments de projectiles prélevés sur des soldats ayant reçu des éclats.

37. On le trouve sur le site www.aepi.army.mil/Library/AEPI%20Publications/DU/contents.html.

isotope	uranium naturel	uranium appauvri	uranium enrichi	combustible usé	uranium de retraitement	retraité appauvri	retraité enrichi
235	0,7	0,2	3,5	≈ 0,8	≈ 0,8	≈ 0,2	≈ 3,5
236	0	0	0	≈ 0,36	≈ 0,36	≈ 0,16	≈ 1,2

Tableau 6 La répartition (%) des principaux isotopes de l'uranium. On n'a pas indiqué 238, toujours dominant, c'est le complément à 100%. Les flèches indiquent les flux qui relient ou mélangent les différentes catégories. L'épaisseur des flèches donne une indication de l'importance du flux. Sous le tableau, les flux vers l'uranium appauvri disponible.

Le combustible usé provient du réacteur qui est lui-même alimenté en uranium enrichi (ce flux est représenté) et en bien moindre quantité en uranium de retraitement enrichi (non représenté). Ce dernier non mélangé, n'est pas recyclé une seconde fois.

Le grisé présent dans la colonne du combustible usé rappelle la présence de cendres (produits de fission et transuraniens) très radioactives. Ces produits sont séparés et éliminés au moment du retraitement mais leur présence plus ou moins atténuée peut être retrouvée dans l'uranium de retraitement appauvri et finalement dans le mélange des appauvris s'il est pratiqué. Ce tableau correspond au cas du fonctionnement "civil" du réacteur.

Le chemin qui mène du combustible, au combustible usé puis à l'uranium de retraitement et à l'uranium appauvri de deuxième génération.

Procéder, par retraitement, à l'extraction de l'uranium du combustible usé puis à son enrichissement n'est pas une mince affaire car ce combustible usé contient bien autre chose que ces isotopes de l'uranium. Expliquons pourquoi en suivant le sort du combustible dans le réacteur. Les mécanismes à l'œuvre sont les mêmes dans les deux types civil ou militaire, ils sont esquissés dans le tableau ci-contre.

Dans le réacteur civil, quand le combustible a en quelque sorte brûlé, la proportion de ^{235}U a trop baissé et on décharge le combustible. Il se

compose du reste de combustible vrai ^{235}U qui est passé de 3.5% à $\approx 0.8\%$, de ce qui reste de l'uranium incombustible ^{238}U , mais il en reste beaucoup, et des *cendres*, produits de fission et transuraniens dont beaucoup sont radioactives et forment un ensemble *très radioactif* si bien que la première chose à faire est ... d'attendre que les cendres refroidissent en quelque sorte: les radionucléides aux périodes les plus courtes se sont éliminés ou ont fortement baissé. On attend ainsi plusieurs années.

On disait "très radioactif". Après trois ans de refroidissement ce mélange, où tout de même ^{238}U est largement dominant en masse, a une activité 30 millions de fois plus grande que celle due à ^{238}U . L'essentiel dû aux produits de fission en activité bêta, avec cependant une activité alpha due aux transuraniens 10 mille fois plus grande que celle d' ^{238}U . Mais pourquoi tellement radioactif?

Au départ, l'essentiel de la masse est dans ^{238}U et ^{235}U , deux radionucléides à vie très longue, peu radioactifs donc. À l'arrivée, 5% de cette masse a subi une transmutation, avec d'une part 3% (après refroidissement) qui ont conduit vers des produits de fission stables, et là on a perdu un peu d'activité, et d'autre part 2% qui ont conduit vers les transuraniens et des produits de fission instables et là, avec des durées de vie courtes ou moyennes, on a terriblement "gagné" en activité.

Ce combustible usé n'est cependant pas ainsi abandonné. D'une part, il contient deux éléments précieux qu'on va vouloir récupérer. L'un est ^{235}U on l'a dit plus haut, l'autre est ^{239}Pu également fissile et réutilisable dans des réacteurs (combustible MOX). D'autre part, on va vouloir également isoler au maximum les éléments radioactifs pour une gestion pas trop volumineuse

Le combustible: ^{235}U , fissile, ^{238}U , non fissile...
 Sous l'effet des neutrons...
 ^{235}U fissionne c'est à dire se casse en deux noyaux moyens:
 ... les **produits de fission**...
 ... et redonne des NEUTRONS...
 qui provoquent la fission d'autres noyaux d' ^{235}U etc...
 C'est la réaction en chaîne, c'est la source de l'énergie.
 Mais les neutrons provoquent aussi d'autres réactions...
 Avec ^{238}U , abondant, ils peuplent les **transuraniens**...
 dont les plutonium et dont ^{239}Pu fissile, lui.
 Avec ^{235}U , d'autres réactions que la fission sont possibles...
 en particulier la capture neutronique qui peuple le "fameux" ^{236}U ,
 notre marqueur de contamination.

Les mécanismes à l'œuvre dans un réacteur.

de ces déchets. On va d'abord séparer les produits de fission, puis **extraire** U et Pu par une opération chimique (tous les isotopes de chacun des éléments en même temps), puis séparer le plutonium de l'uranium pour obtenir l'**uranium de retraitement** et pour enfin procéder à la séparation isotopique de l'uranium (revoir le tableau (6)) et arriver à la production de l'**uranium appauvri de deuxième génération**.

Entre le combustible usé et l'uranium appauvri de deuxième génération, de nombreuses opérations chimiques et physiques sont accomplies qui réduisent considérablement le taux des impuretés. Mais ces opérations sont imparfaites et le mélange des deux types d'uranium appauvri va introduire des impuretés radiotoxiques en même temps que ^{236}U . Changent-elles la radiotoxicité de l'uranium appauvri? Seules des mesures peuvent répondre à cette question. On peut donner un aperçu des qualités nécessaires des séparations pour que l'activité du mélange, ou plus précisément sa radio-toxicité, soit peu changée par rapport à un uranium appauvri de première génération. Cette évaluation est faite dans le tableau (7) pour quelques-uns des radionucléides les plus susceptibles de contaminer l'uranium une dizaine d'années après le retraitement. ^{236}U est supposé³⁸ présent à 0,005% avec son cortège de contaminants en proportion correspondante. Le facteur de qualité de la séparation chimique a été calculé pour que la radio-toxicité de chacun des contaminants examinés soit le dixième de celle du composant principal ^{238}U . C'est ^{241}Pu , très actif mais peu radio-toxique, qui conduit au facteur le plus exigeant. **De tels facteurs sont accessibles, on peut atteindre aujourd'hui 10^7** . Mais les stocks d'uranium appauvri ont été constitués sur près de 50 ans et cette qualité de séparation n'a pas toujours été pratiquée. **En supposant une très mauvaise séparation qui laisserait par exemple 1% des contaminants, on arrive à une toxicité 20 fois supérieure à celle de l'uranium appauvri de première génération.**

radionucléide	période années	quantité relative ^a	activité relative	radiotoxicité relative ^b	facteur d'élimination nécessaire ^c
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$	20 000	1	1	-
^{236}U	$2,3 \cdot 10^7$	1	0,01	1	-
^{239}Pu	24 100	1,4	13	17	2200
^{240}Pu	6 570	0,54	18	17	3 100
^{241}Pu	14,4	0,29	4500	0,31	14 000
^{90}Sr	28	2,05	16 000	0,012	1900
^{137}Cs	30	3,45	26 000	0,0016	410

Tableau 7 L'uranium 238, le marqueur de contamination ^{236}U et les contaminants. Cas du réacteur civil.

^a Les quantités sont en nombre d'atomes (mais pour des nucléides de masses atomiques voisines, U et Pu, ce sont aussi bien les poids). Les contaminants sont rapportés à ^{236}U dans le combustible usé et le rapport à ^{238}U - 20 000 - signe la valeur 0,005% du rapport supposé $^{236}\text{U}/^{238}\text{U}$.

^b Rapport des coefficients de dose pour l'inhalation, en sievert par becquerel, extraits de la Publication 72 de la CIPR, voir plus haut.

^c Le facteur d'élimination (séparation, purification, éventuellement enrichissement) indiqué est nécessaire pour amener le contaminant considéré à un niveau de radiotoxicité du dixième de celui de ^{238}U . Ce facteur est donc le produit de l'activité (relative) par la radiotoxicité (relative), multiplié par dix.

Le cas des réacteurs "plutonigènes" à vocation militaire.

Pourquoi le plutonium extrait d'un réacteur civil typique n'est-il pas approprié pour une utilisation militaire? Pour fabriquer des bombes, on cherche un matériau fissile de masse critique³⁹ aussi petite que possible et dont la radioactivité ne rendra pas la manipulation et le transport difficiles. L'isotope ^{239}Pu satisfait à ces conditions, mais dans un réacteur civil, il est accompagné de ^{240}Pu et ^{241}Pu en quantités assez importantes pour augmenter radicalement la masse critique. De plus, et comme cela apparaît à l'examen du tableau (7), ^{241}Pu apporte aussi une activité considérable.

Peut-on éviter ces deux isotopes? Non, mais on peut diminuer leur production relative. Ces deux isotopes sont en effet produits dans le réacteur à partir de ^{239}Pu (lui-même absent au début du cycle) par capture successive de neutrons. La pureté de ^{239}Pu est donc très grande en début du cycle et se dégrade avec le temps : on doit arrêter très tôt la combustion. Il est alors préférable d'utiliser de l'uranium naturel bien moins coûteux que l'enrichi. Typiquement, ^{235}U passe de 0,7% à 0,65% (le combustible est peu brûlé), ^{234}U est pratiquement inchangé (légèrement affaibli), ^{236}U apparaît à 0,008% (au lieu de 0,36% dans le civil). Là aussi, ^{235}U est proche de sa concentration dans le naturel et reste donc candidat pour être enrichi et produire ainsi une autre qualité d'uranium appauvri de deuxième génération.

Le tableau (7) est alors modifié mais, pour l'essentiel, seules⁴⁰ les lignes correspondantes à Pu sont différentes et sont présentées dans le tableau (8) où on a gardé les valeurs du civil entre parenthèses pour comparaison.

C'est maintenant ^{239}Pu qui nécessite le facteur de qualité le plus grand, 15 000, voisin de ce qu'exigeait ^{241}Pu dans le cas du réacteur civil. **Ce facteur reste accessible**, on l'a dit plus haut mais il n'est peut-être pas aussi probable que les opérations nécessaires aient été effectivement accomplies. Il n'est par exemple pas impossible que seul Pu ait été extrait laissant un uranium légèrement appauvri mais contaminé. **Ici aussi, en supposant une très mauvaise séparation qui laisserait 1% des contaminants,**

38. C'est ce qui conduit à la valeur 20 000 pour la quantité de ^{238}U .

39. C'est la masse minimale dans laquelle la réaction en chaîne de fission diverge.

40. Attention que les quantités de contaminants radioactifs rapportées à ^{238}U sont bien plus grandes au déchargement du réacteur civil. C'est parce que ces quantités sont rapportées ici à l'un d'entre eux, ^{236}U , que les quantités de produits de fission ne changent pas quand on passe au fonctionnement "militaire".

on arrive à une toxicité 20 fois supérieure à celle de l'uranium appauvri de première génération ⁴¹.

Des informations partielles ont été apportées concernant la présence d'éléments transuraniens et de produits de fission dans le matériau (uranium appauvri) utilisé pour les obus flèches. Des informations officielles américaines

radionucléide	période	quantité	activité	radiotoxicité	élimination
²³⁹ Pu	24 100	9,2(1,4)	86(13)	17	15 000 (2 200)
²⁴⁰ Pu	6 570	0,61(0,54)	21(18)	17	3 600 (3 100)
²⁴¹ Pu	14,4	0,012(0,29)	186(4 500)	0,31	600 (14 000)

tableau 8 Les plutonium contaminants dans le cas d'un réacteur plutonigène. Voir légende et notes du tableau (7). Entre parenthèses, les valeurs correspondantes du réacteur civil.

et françaises ont confirmé la présence de ces éléments mais avec des teneurs suffisamment faibles pour que la radiotoxicité globale du matériau ne soit pas ou pas notablement changée. Des résultats d'analyses sur des matériaux provenant du terrain ont confirmé ces déclarations ou même n'ont pas trouvé trace de ces éléments. Il semble cependant que l'ensemble de ces informations concerne plutôt les Balkans et que rien ne soit aujourd'hui connu ou communiqué concernant le Golfe où le tonnage utilisé est bien plus important, ni sur les guerres plus récentes Afghanistan et Irak. Rappelons que le stock d'uranium appauvri a été constitué sur cinquante ans de pratiques et de contextes extrêmement variables.

En tout état de cause, si les vérifications concernant transuraniens et produits de fission s'avèrent heureusement rassurantes, elles ne doivent pas détourner l'attention de l'essentiel : les risques propres du matériau lui-même, l'uranium appauvri.

6 En conclusion...

Avec des hypothèses très raisonnables et certainement pas maximalistes, nous avons montré que l'emploi d'obus utilisant une charge d'uranium appauvri pouvait conduire à des dangers durables pour l'environnement et les populations civiles voisines. Ces dangers résultent d'abord de la fraction de l'obus dispersée en poussières contaminantes. Si le danger concernant la partie de la charge restée en bloc est moindre ⁴², c'est à condition que ces blocs soient récupérés rapidement par des organismes compétents. Seules des mesures, des enquêtes, des études de groupes pluridisciplinaires de travail pourront aboutir à des appréciations quantitatives et à des propositions de dispositions concrètes de protection. Les commissions, les experts doivent être indépendants des États et bien sûr des militaires.

Les réflexions présentées ci-dessus ne peuvent constituer qu'une trame d'analyse du problème. Elles nous semblent cependant incontournables. De nombreuses données utiles à un examen plus précis du problème nous sont inconnues et nous terminerons donc aussi par des questions.

- Des mesures ont-elles été effectuées dans les pays nouvellement concernés, Afghanistan, Irak (de nouveau)?
- Les responsables dans ces mêmes pays ont-ils été prévenus des effets à long terme de ces engins et des précautions à prendre (lesquelles) pour leur évacuation et pour la dépollution des zones contaminées là où c'est nécessaire?
- Les chiffres utilisés ici (300g d'uranium par charge, 30% dispersés par usure ou combustion) doivent-ils être revus? à la hausse ou à la baisse? Quels seraient les chiffres correspondants pour les obus de 120mm? Quels seraient les chiffres correspondants pour missiles?
- Combien de ces obus ont-ils été tirés? en Irak? en Yougoslavie? en Afghanistan? Les sites en sont-ils répertoriés? Vont-ils être rendus publics?
- Si l'économie semble ⁴³ être la raison du remplacement du tungstène par l'uranium appauvri,

41. Ce facteur (20), comme les facteurs d'élimination des tableaux 7 et 8, est calculé avec une concentration de ²³⁸U de 0,005%. Tous ces facteurs varient proportionnellement avec cette concentration.

42. Il est moindre en ce qui concerne le risque probabiliste mais on doit signaler le risque *déterministe* de provoquer des lésions ou rougeurs sur la peau après un contact prolongé à même la peau : on atteint la dose (annuelle) pour ce risque (50 mSv) après seulement 25 heures de contact. Penser qu'un enfant peut garder cet objet dans sa poche et le prendre en main trop souvent. N'y a-t-il pas aussi le risque de cancer de la peau dans ces conditions?

43. Mais si c'est le caractère pyrophorique de l'uranium qui l'a fait choisir, la nécessaire dispersion de poussières contaminantes qui résulte de ce caractère ne pouvait être ignorée.

est-il acceptable que cette économie soit mise en balance avec la **dispersion** en quantité de produits radioactifs à longue période?

- Quelles sont les réserves de ces armes prêtes à être utilisées?
- N'est-il pas temps d'envisager l'interdiction de leur usage ou au moins des restrictions majeures : emploi défensif sur le territoire de celui qui l'utilise par exemple?

En priorité, douze ans après la guerre du Golfe, trois ans après celle du Kosovo, un an après l'Afghanistan et quelques semaines après l'Irak (de nouveau) il faut intervenir par des enquêtes et des mesures sur le terrain, mais aussi des mesures avec les gens qui y vivent. Cela est possible. Pour n'importe quel élément radioactif, les méthodes de détection physique, associées ou non à une extraction chimique, sont tellement sensibles qu'elles permettent de mesurer des quantités très largement inférieures aux limites acceptables de contamination (radioactive ou chimique). C'est un avantage décisif de la radioactivité. **A condition de ne pas perdre de temps**⁴⁴.

Remerciements.

L. Audouin, F. Clapier, A. Coc, G. D'Alessandro, S. David, M. De Saint Simon, M. Genet, M. Meissonnier, R. Meunier, N. Pauwells, A. Picot, J. Proust, B. Ramstein, et J.P. Schapira sont remerciés pour des contributions dont certaines ont été essentielles, sans bien sûr qu'ils soient en rien engagés sur les opinions exprimées ici.

44. la période biologique de l'uranium varie de quelques heures à quelques années

Annexe A

- **Un élément, symbole U, numéro atomique Z=92.**
- **Des isotopes, de ^{218}U à ^{242}U , tous radioactifs.**
 ^{238}U a la demi-vie la plus longue^a : 4,9 milliards d'années.
- **Uranium naturel, poids atomique 238,029,**
mélange de trois isotopes :
en masse : ^{238}U ; 99,3% ^{235}U ; 0,7% ^{234}U ; 0,0055%
activité^b : 12 000 Bq /g 600 Bq/g 12 000 Bq/g
- **^{238}U est la tête d'une famille radioactive.**
Après 14 désintégrations successives, il descend jusqu'au ^{206}Pb .
- **^{238}U isolé, est accompagné après quelques semaines, de ses deux premiers descendants, ^{234}Th et ^{234}Pa , chacun avec 12 000 Bq/g.**
- **^{235}U est seul fissile.** Pour le combustible des centrales, on **enrichit** l'uranium en ^{235}U de 0,7 à 3,5%.
Dans le déchet, "**l'uranium appauvri**", la concentration en ^{235}U descend de 0,7 à 0,2% ;
l'appauvrissement est plus radical encore pour ^{234}U .
- **L'uranium est dense, 19 g/cm^3 , plus que le plomb (11,3), un peu moins que le tungstène (19,3).**
- **L'uranium est pyrophorique.**
- **L'uranium et ses composés sont toxiques aussi bien d'un point de vue chimique que d'un point de vue radiologique.**

^a c'est avec cette demi-vie que la terre, chauffée par l'uranium, se refroidit.

^b donnée en becquerels (désintégrations par seconde) par gramme de mélange.

Carte d'identité de l'uranium.

Annexe B

^{14}C (β)	T= 5700 ans	0,000 2 mSv
	1 000 Bq	0,005 8 mSv
	m= 6,1 ng	
^{40}K (β)	T= $1,3 \cdot 10^9$ ans	0,002 1 mSv
	1 000 Bq	0,002 1 mSv
	m= 3,9 mg	
^{131}I (β, γ)	T= 8 jours	0,007 4 mSv
	1 000 Bq	0,001 6 mSv
	m= 0,22 pg	
^{137}Cs (β, γ)	T= 30 ans	0,004 6 mSv
	1 000 Bq	0,039 0 mSv
	m= 0,31 ng	
^{238}U (α)	T= $4,5 \cdot 10^9$ ans	0,5 mSv
	1 000 Bq	8,0 mSv
	m= 80 mg	
^{239}Pu (α)	T= 24 000 ans	120 mSv
	1 000 Bq	16 mSv
	m= 0,43 μg	
^{241}Pu (β)	T= 14 ans	2,3 mSv
	1 000 Bq	0,2 mSv
	m= 0,26 ng	

Dose efficace engagée pour l'inhalation de 1 000 Bq de différents radionucléides. Pour chacun d'eux, on a indiqué la nature du rayonnement dominant, la période et la masse correspondante. Deux doses sont données: en haut pour un produit à absorption rapide, en bas, absorption lente.

sa forme chimique et physique. La limite de la dose annuelle acceptable est aujourd'hui fixée à 1 mSv. Rappelons qu'il s'agit d'une limite sur l'excès de dose puisque les causes naturelles ou médicales courantes conduisent à une dose moyenne de 3,5 mSv.

On insiste sur la distinction entre activité et toxicité, entre les becquerels et les sieverts.

La radioprotection, répétons le, est complexe, diversifiée, elle est traitée par des métiers eux aussi diversifiés. Pour la contamination, la physique n'est qu'une faible partie des disciplines concernées. On ne peut résumer ce domaine en quelques lignes. Il est cependant utile de focaliser l'attention sur une distinction essentielle, et pourtant souvent omise, car elle ne concerne pas des nuances mais bien des ordres de grandeur quand on veut évaluer la nocivité de telle pratique ou de telle pollution. Le texte initial n'a peut-être pas assez insisté sur ce point.

L'activité (la radio-activité) d'un radionucléide se mesure en becquerels, le nombre de désintégrations par seconde. Pour un radionucléide donné et donc de période donnée, cela définit sa quantité, sa masse. Tout est dans la physique.

La radiotoxicité concerne la contamination, l'incorporation par inhalation ou ingestion d'une certaine quantité (ou activité) d'un radionucléide donné. Cette toxicité se mesure avec la **dose efficace engagée**, et se mesure en sieverts (attention que cette même unité mesure hélas aussi d'autres grandeurs!). Cette dose est certes proportionnelle à la quantité de contaminant, à son activité donc mais elle dépend de la nature du rayonnement, de son énergie, du site biologique où sera stocké le contaminant et de la sensibilité de l'organe aux rayonnements ionisants, de la durée de présence sur ce site (on retrouve une dépendance sur la nature du composé chimique en jeu et éventuellement de sa forme physique), en même temps que de la période radioactive du radionucléide et finalement de l'âge du contaminé.

Pour montrer la variabilité de cette dose, on indique la dose efficace engagée correspondant à une même activité de 1 000 Bq pour différents radionucléides. Ces doses résultent des évaluations de l'ICRP pour l'inhalation (il existe d'autres chiffres pour l'ingestion) d'un contaminant par un adulte. Ces doses croissent quand l'âge décroît, pour un enfant de trois mois elles sont en général de 2 à 5 fois supérieures à celles de l'adulte. Deux valeurs de dose sont données correspondant en haut à une absorption rapide, en bas lente du contaminant, c'est là qu'intervient