Commentaire sur le document « Posons-nous les bonnes questions? » de la SGDN

par G. Sabourin et J. Franta

Le commentaire que nous soumettons fait suite à la discussion de l'un de nous (J. Franta) avec le journaliste scientifique du Toronto Star, Peter Calamai, sur son article du 6 décembre 2003, « Assez déjà pour remplir cinq patinoires de hockey. »

M. Calamai a renvoyé M. Franta au document « Posons-nous les bonnes questions? » de la SGDN pour appuyer ses déclarations sur les déchets nucléaires, déclarations que M. Franta considéraient trompeuses ou tout simplement erronées. On peut en effet trouver de telles déclarations dans le document de la SGDN, de même que d'autres faiblesses. Ainsi la réponse à la question principale, « Le problème a-t-il été clairement défini? » est « non. »

Dans notre commentaire, nous limitons l'expression de nos préoccupations aux trois sections suivantes:

1. « Contexte », une section de six pages au chapitre 1 ;
2. « Qu'entend-on par combustible nucléaire irradié ? »,
   une section de trois pages au chapitre 2 et
3. « Pourquoi le combustible nucléaire irradié est-il dangereux ? »,
   une section de deux pages, également au chapitre 2.

La raison pour laquelle nous n'avons pas soumis de commentaires sur les documents de la SGDN précédemment est que nous ignorions que la SGDN invitait les gens à faire des soumissions sur son site web ou qu'elle y plaçait les commentaires soumis. Après avoir trouvé ces items, nous pouvons dire qu'ils ne ressortent certainement pas sur le site web. Au lieu de cela, ce sont les Exposés introductifs qui ressortent, dont beaucoup embrassent des points de vue fortement discutables, mais sont présentés en tant qu'information « contextuelle concernant l'état des connaissances sur divers sujets reliés à la gestion des déchets nucléaires … (afin) d'apporter une contribution à un dialogue éclairé. »

Commentaires sur le « Contexte »

En limitant « l'histoire de l'énergie nucléaire au Canada » à la science et à la technologie créées par les êtres humains, le document de la SGDN perpétue le mythe du caractère exceptionnel des déchets nucléaires radioactifs, mythe qui est responsable d'une grande partie de la crainte du grand public de tout ce qui est nucléaire, que ce soit l'énergie, la médecine, la stérilisation, le contrôle des parasites ou autres.

De telles présentations myopes du « contexte » ne sont pas restées sans contestation dans le passé. La description de la terre comme « un morceau, de la taille d'une planète, constitué des retombées radioactives d'une explosion nucléaire stellaire, une supernova, qui a synthétisé les éléments qui ont fait notre planète et nous-mêmes » est un exemple d'un contexte approprié, dans ce cas-ci fourni par le professeur James Lovelock, un des scientifiques qui a contribué au développement de la conscience environnementale depuis les années 60. Le défunt astronome américain Carl Sagan ainsi

que l'astrophysicien Hubert Reeves ont tous deux dit, que « nous sommes faits de poussières d'étoiles », une autre référence aux déchets nucléaires des réactions de fusion dans les étoiles géantes et les explosions stellaires.

On fait référence à la radioactivité naturelle due à la décroissance des déchets nucléaires qui ont formé la terre il y a presque cinq milliards d'années dans la section « Pourquoi le combustible nucléaire irradié est-il dangereux ? » à la page 28, mais le lecteur occasionnel n'a aucun indice pour savoir d'où vient cette radioactivité, puisqu'elle n'est pas mentionnée dans la section de contexte. Ne pas connaître l'origine naturelle de ces résidus radioactifs des déchets nucléaires qui ont formé la terre et nous-mêmes, perpétue évidemment le mythe du caractère exceptionnel des déchets nucléaires radioactifs synthétiques dans l'esprit du grand public.

Selon le Dr Philippe Duport, directeur du Centre international de recherche sur les faibles doses de radiation à l'université d'Ottawa (traduit de l'anglais[1]),

> « La croûte terrestre contient environ soixante-dix éléments chimiques qui sont naturellement radioactifs. Ils nous irradient de l'extérieur et de l'intérieur de notre corps. L'uranium et le thorium constituent la majeure partie des matériaux radioactifs contenus dans les roches et le sol. Ils émettent des rayonnements gamma et libèrent un gaz radioactif (le radon), qui est présent partout en quantités variables. Il y a des régions fortement peuplées dans le monde où les niveaux naturels moyens de rayonnements excèdent plusieurs fois la dose canadienne maximale pour des ouvriers de l'industrie nucléaire. *Si on observait de tels niveaux dans une installation nucléaire canadienne, leur opérateur serait obligé de réduire radicalement les expositions à la radiation et, s'il n'y réussissait pas, de mettre l'installation à l'arrêt.* Typiquement, le premier mètre en profondeur d'une parcelle de terrain de 15 mètres par 25 mètres d'une maison résidentielle contient, en moyenne, trois kilogrammes d'uranium et dix kilogrammes de thorium. Un des éléments provenant de la décroissance de l'uranium est un gaz appelé radon. Le radon s'échappe continuellement dans l'air à la surface de la terre. En moyenne, chaque mètre carré de sol libère environ 10 mille atomes de radon chaque seconde, ce qui en fait une source radioactive de 10,000 Becquerels. Le radon, qui est également radioactif, se transforme en une série d'autres éléments radioactifs, l'un d'entre eux étant le polonium-210. La pluie, le brouillard, la neige, et la poussière ramènent le polonium-210 de nouveau sur le sol, où il s'accumule. Puisque la source du radon ne s'arrête jamais, la quantité et l'activité du polonium sur le sol demeurent constants à environ 10,000 Becquerels par mètre carré. La Commission internationale sur la radioprotection calcule que le polonium-210 est cinq à dix fois plus nocif que le plutonium-239. Par conséquent, en termes de risque théorique de cancer dû à la radioactivité, 10,000 Becquerels de polonium-210 sont équivalents à 50,000 à 100,000 Becquerels de plutonium-239. Si on convertit la quantité de polonium-210 sur la terre en masse de plutonium qui présente le même danger théorique à la santé, il y a l'équivalent de 0.044 mg de plutonium par mètre carré de terrain. Ceci ne semble pas beaucoup, mais pour la seule province de Québec – d'une superficie de 1.5 millions de kilomètres carrés - c'est équivalent à environ 60 tonnes de plutonium-239. On peut objecter que c'est une comparaison injuste parce que la dispersion des matériaux radioactifs réduit le risque, mais c'est exactement l'argument que j'avance: le risque peut être réduit à zéro lorsque les niveaux d'exposition sont assez bas. »

[1] Comments on Dr. Rosalie Bertell's presentation before the Senate Standing Committee on Energy, Environment and Natural Resources, September 21, 2000.

Le fait que l'uranium est utilisé - et consommé - dans des réacteurs nucléaires modernes - réacteurs nucléaires canadiens - est une raison suffisante pour que son origine soit décrite dans la section de contexte de tout document essayant d'aborder la problématique de gestion des déchets nucléaires dans un forum public.

En omettant toute mention de l'origine (la « nucléosynthèse ») des réserves terrestres d'uranium, le document de la SGDN non seulement ne fournit pas la perspective appropriée, il dissimule involontairement le fait que l'effet à long terme de l'utilisation à grande échelle de l'énergie nucléaire est une diminution significative de la quantité d'uranium naturel et de ses produits radioactifs de décroissance - et par conséquent a l'effet d'une diminution nette à long terme de la radioactivité dans l'environnement global. Le public est informé seulement de la radioactivité intense des déchets nucléaires synthétiques, mais reste ignorant du fait que cette intensité est inversement proportionnelle au taux de décroissance de ces déchets et par conséquent à sa transformation rapide d'élément radioactif à non-radioactif, comparativement aux matériaux radioactifs à longue durée de vie comme l'uranium, le thorium, le potassium-40, etc...

Ainsi que l'ont déjà souligné d'autres personnes dans leurs Commentaires soumis sur le site Web de la SGDN, ce que nous venons de mentionner est un exemple de la tendance qu'a la SGDN de donner seulement les aspects négatifs de la problématique.

Commentaires sur « Qu'entend-on par combustible nucléaire irradié ? »

Pour un lecteur occasionnel, cette section semble probablement fournir une introduction concise aux aspects techniques du combustible nucléaire irradié. En fait, elle omet tellement de choses qu'elle présente une image tronquée de la réalité. On ne dit pas non plus où les Canadiens sont censés obtenir ces détails manquants.

Après avoir lu cette section, le lecteur occasionnel ne saura certainement pas la réponse à la question « Qu'entend-on par combustible nucléaire irradié ? » bien qu'il puisse le penser. L'implantation de fausses perceptions est responsable du manque de compréhension de la réalité par le public. Le résultat en est une perception déformée de la réalité, et des opinions (des peurs) basées sur des fictions.

Par exemple, la déclaration que « le combustible irradié présente un risque radiologique élevé et de très longue durée » est un non-sens : comme mentionné plus haut, la radioactivité est inversement proportionnelle à la durée de vie (ou à la demi-vie) ; ainsi donc, soit la radioactivité est élevée, soit elle est de longue durée, mais pas les deux. Bien que le combustible nouvellement irradié contienne à la fois des radio-isotopes à courte et à longue durée de vie, les radio-isotopes au « risque radiologique élevé » ont une courte durée de vie, tandis que les radio-isotopes à longue durée de vie sont « faiblement radioactifs. » C'est pour cette raison que la radioactivité du combustible nouvellement irradié est grande, alors que celle du combustible irradié après quelques centaines d'années est faible et n'exige plus de manipulation à distance. Cette dernière remarque n'est jamais faite dans le document. C'est inacceptable.

Est également absurde la prétention de la SGDN que « le tableau 2.1 dresse la liste des produits de fission les plus importants. » Les plus importants selon quelle mesure ? En fait la liste du tableau 2.1 semble complètement arbitraire, et le critère de sélection n'est pas indiqué. Si on regarde les radio-

isotopes au « risque radiologique élevé » contenus dans le combustible nouvellement irradié, on trouve que les produits de fission les plus significatifs - mesurés par la quantité de chaleur et de radioactivité (la chaleur étant produite par la radioactivité) - sont des radio-isotopes tels que l'iode-138, l'antimoine-124, le niobium-100 et l'iode-134, qui ont une demi-vie inférieure à quelques heures, et donc ne sont plus présents dans le combustible irradié après une journée ou deux. Ces radio-isotopes n'apparaissent pas dans le tableau 2.1 des produits de fission les plus significatifs. Le tableau fourni ici (tableau 1, page suivante) donne la liste des radio-isotopes qui émettent presque 100% de la radioactivité du combustible nouvellement irradié, mais il n'inclut aucun de ceux présentés dans le tableau 2.1 de la SGDN, parce que leur contribution à la radioactivité totale (et à la chaleur) est trop minuscule pour être importante à ce stade. En fait leur contribution devient partiellement significative plusieurs années plus tard, quand la radioactivité globale du combustible nucléaire irradié est devenue une minuscule fraction de celle du combustible nouvellement irradié.

Si on regarde très loin dans le futur, la radioactivité du combustible nucléaire irradié est la même que celle de l'uranium naturel et de ses produits de décroissance, en raison de leur longue durée de vie, 4.5 milliards d'années pour l'uranium-238 et 710 millions d'années pour l'uranium-235. Aucun des « produits de fission significatifs » énumérés dans le tableau 2.1 ne sera présent dans le futur éloigné, alors que presque tout l'uranium non-irradié sera toujours là. D'ailleurs, cet uranium sera toujours là indépendamment qu'il soit dans le sol comme minerai ou dans une vieille grappe de combustible nucléaire irradié. La seule différence est que dans la grappe irradiée une partie de l'uranium aura été détruite par fission et sera transformée en produits de fission à durée de vie beaucoup plus courte. Comme mentionné précédemment, l'effet net est une réduction globale de la radioactivité terrestre. En fait, selon le professeur de physique Bernard Cohen de l'université de Pittsburgh, « Si on prend en considération les effets du radon, l'extraction de l'uranium hors du sol [pour la production de combustible nucléaire] est une activité qui sauve beaucoup de vies, des centaines de vies par gigawatt-année d'électricité produite, tandis que les déchets nucléaires entreposés en profondeur tuent bien moins qu'une vie [par gigawatt-année d'électricité produite]. Tout ceci est basé sur la théorie de la relation linéaire sans seuil et sur l'évaluation des risques probabilistes. »

Donc, qu'y a-t-il de « très significatifs » à propos des produits de fission du tableau 2.1? Pas grand chose. On peut seulement spéculer que l'auteur du tableau 2.1 pensait que les radio-isotopes sélectionnés étaient « significatifs » dans le sens qu'ils apparaissent effrayants au lecteur occasionnel, à cause de leurs longues demi-vies. Mais, comme a dit Einstein il y a bien longtemps, « tout est relatif » ! Le potassium-40 naturel qui se trouve dans notre corps, a une demi-vie de 1.3 milliards d'années, et y sera toujours longtemps après que nous soyons tous morts et que tous les produits de fission « les plus significatifs » du tableau 2.1 de la SGDN aient disparus.

Dans l'introduction au tableau 2.2, les « principaux actinides du combustible irradié », on ne mentionne pas que les actinides avec les plus longues demi-vies sont identiques à ceux du combustible frais, avant l'irradiation. Le tableau 2.4 fournit la comparaison numérique qui illustre cela très bien, mais on suppose une très grande attention de la part du lecteur, une connaissance scientifique approfondie et la capacité de discerner le fait que près de 100% du combustible irradié est identique au combustible non-irradié, et identique également à l'uranium alors qu'il se trouvait dans le sol sous forme de minerai, avant le raffinement et la fabrication des grappes de combustible. La confirmation de ce fait est fournie à la page 27, par la déclaration « une quantité relativement petite du matériau se transforme à l'intérieur du combustible - seulement environ 1.3% du combustible se trouve modifié. » Mais on laisse à nouveau le lecteur occasionnel se poser la

question : « modifié par rapport à quoi ? » En outre, l'introduction au tableau 2.2 ne mentionne pas le fait que l'américium-241, avec une demi-vie de 460 ans, est un sous-produit très utile des réacteurs nucléaires, utilisé dans les détecteurs de fumée chez des millions de canadiens. On pourrait avancer

TABLEAU 1

Mégawatts de chaleur (en parenthèse) dégagés par les produits de fission

(regroupés selon leur demi-vie; suite à l'arrêt d'un réacteur de 3,000 mégawatts thermiques)

demi-vie, $T_{½}$						
<7 s	7 à 70 s	70 s à 12 min	12 min à 2 h	2 à 19 h	19 h à 8 jours	>8 jours
^{138}I(**4.2**)	^{140}Cs(2.8)	^{100}Nb(**3.6**)	^{134}I(**3.4**)	^{132}I(2.1)	^{140}La(2.6)	^{144}Ce / ^{144}Pr }(0.9)
^{124}Sb(**3.6**)	^{135}Te(2.2)	^{98m}Nb(2.7)	^{138}Cs(2.9)	^{135}I(1.8)	^{133}I(1.1)	
^{92}Rb(2.4)	^{139}Xe(2.0)	^{96}Y(2.6)	^{104}Tc(2.8)	^{97}Zr(1.3)	^{143}Ce(0.6)	^{106}Ru / ^{106}Rh }(0.8)
^{93}Rb(1.8)	^{143}Ba(1.6)	^{132}Sb(2.4)	^{134}Te(2.7)	^{92}Y(1.0)	^{131}I(0.3)	
^{97}Y(1.8)	^{95}Sr(1.5)	^{95}Y(2.2)	^{142}La(2.6)	^{93}Y(0.8)	^{132}Te(0.3)	^{95}Zr(0.7)
^{144}La(1.7)	^{90}Kr(1.4)	^{90}Rb(2.0)	^{133m}Te(2.3)	^{141}La(0.8)	^{133}Xe(0.3)	^{95}Nb(0.7)
^{142}Cs(1.4)	^{105}Mo(1.2)	^{137}Xe(1.9)	^{141}Ba(1.9)	^{88}Kr(0.7)	^{99}Mo(0.2)	^{104}Ba(0.5)
^{139}I(1.4)	^{141}Cs(1.2)	^{139}Cs(1.8)	^{101}Mo(1.7)	^{91}Sr(0.6)		^{91}Y(0.4)
^{94}Rb(1.3)	^{87}Br(1.1)	^{93}Sr(1.7)	^{94}Y(1.6)	^{105}Ru(0.6)		^{103}Ru(0.4)
^{89}Br(1.2)	^{101}Nb(0.9)	^{133}Sb(1.6)	^{143}La(1.5)	^{145}Pr(0.4)		^{89}Sr(0.3)
^{95}Rb(0.8)	^{103}Mo(0.9)	^{136}I(1.5)	^{138}Xe(1.3)			^{134}Cs(0.3)
^{102}Tc(0.8)	^{106}Tc(0.9)	^{94}Sr(1.4)	^{89}Rb(1.2)			^{141}Ce(0.3)
^{143}Cs(0.7)	^{140}Xe(0.9)	^{102}Mo(1.4)	^{141}Pr(1.1)			^{143}Pr(0.3)
^{141}Xe(0.5)	^{103}Tc(0.8)	^{132}Sn(1.4)	^{97}Nb(1.0)			^{156}Eu(0.2)
^{92}Kr(0.4)	^{105}Tc(0.8)	^{99}Nb(1.3)	^{89}Rb(0.8)			
^{93}Kr(0.3)	^{97m}Nb(0.6)	^{91}Rb(1.2)	^{131}Sb(0.8)			
	^{108}Rh(0.6)	^{89}Kr(1.2)	^{139}Ba(0.8)			
	^{147}Ce(0.6)	^{130}Sn(1.2)	^{101}Tc(0.7)			
	^{86}Br(0.5)	^{142}Ba(1.1)	^{133}Te(0.7)			
	^{91}Kr(0.5)	^{130m}Sb(1.0)	^{87}Kr(0.6)			
	^{98}Zr(0.5)	^{131}Sn(1.0)	^{131}Te(0.6)			
	^{104}Rh(0.5)	^{145}Ce(0.8)	^{129m}Sn(0.4)			
	^{148}Ce(0.5)	^{102m}Tc(0.5)	^{107}Rh(0.3)			
	^{85}Se(0.3)	^{107}Ru(0.5)	^{84}Br(0.2)			
		^{147}Pr(0.5)	^{146}Ce(0.2)			
		^{148}Pr(0.5)				
		^{128m}Sb(0.3)				
		^{149}Pr(0.3)				
Totaux des groupes (MW)						
24.3	**24.8**	**39.6**	**34.1**	**10.1**	**5.4**	**5.8**
Σ = 144						
contributeurs mineurs = 8						
Total 152 MW						

que ce composant particulier des déchets nucléaires a un large appui public et qu'il nous rend tous membre d'un « groupe d'intérêt » que les gens le sachent ou pas. Il y a un autre groupe d'intérêt parmi nous aujourd'hui pour ceux qui doivent leur survie au plutonium, un autre actinide utile du combustible : les personnes dont les stimulateurs cardiaques fonctionnent au plutonium-238. Personne ne propose de stocker des déchets nucléaires à l'intérieur du corps des gens, mais il est clair que c'est exactement ce qui arrive à certains de ses composants. Plusieurs produits de fission radioactifs sont utiles en médecine nucléaire moderne. On estime qu'il y a eu environ 18.4 millions d'examens en médecine nucléaire aux États-Unis seulement en 2002, en hausse de 9.8% par rapport aux 16.8 millions d'examens de 2001, selon un rapport de la Division médicale de l'information de la société de recherches IMV.

À la page 27, les légendes des deux graphiques sont interverties – l'axe de la figure 2.2 possède une échelle linéaire tandis que l'axe de la figure 2.3 est logarithmique.

La déclaration selon laquelle « l'activité [du combustible irradié] rejoint celle de l'uranium naturel et de ses produits de décroissance radioactifs associés après environ un million d'années" laisse de côté tellement de faits qu'elle présente une image tronquée de la réalité. À la place de la figure 2.3, la SGDN aurait dû reproduire le graphique de décroissance d'une de ses propres références, l'exposé introductif sur la sûreté et la santé no 3-2 de la SGDN, *Les déchets fortement radioactifs et la santé des êtres humains*, par John Sutherland d'Edutech Enterprises. Le graphique de Sutherland montre que l'activité totale des déchets fortement radioactifs diminue au-dessous du niveau d'activité du « minerai d'uranium équivalent à une tonne de combustible » après quelques milliers d'années, et il souligne ce fait avec la déclaration suivante : « La croyance générale et largement médiatisée à propos du combustible irradié est qu'il demeure dangereusement radioactif pendant des millions d'années … [mais] cette perception est incorrecte. »

Même si on tient compte de la quantité beaucoup plus grande de minerai d'uranium équivalent à une tonne de combustible pour l'uranium enrichi utilisé dans les PWR, comparativement au combustible d'uranium naturel utilisé dans des nos réacteurs CANDU, la façon de voir présentée par le schéma 2.3 de la SGDN et le texte associé est erronée.

"Activité" est un terme très spécifique, qui implique tous les produits de décroissance radioactifs, y compris ceux qui émettent des rayonnements qui ne sortent pas du combustible irradié ou du minerai d'uranium. Cependant, en ce qui concerne la radioactivité qui sera absorbée par le corps d'une personne ou par ses organes internes lorsqu'elle s'approche d'une vieille grappe de combustible irradié ou d'une pile de minerai d'uranium (i.e. exposition externe), on doit prendre en considération ces faits : les rayons gamma sortiront dans l'espace entourant le matériel et pénétreront dans le corps, mais les particules alpha ne sortiront pas du combustible. Les isotopes émetteurs alpha ont une activité plus élevée dans le combustible irradié que dans l'uranium naturel, pendant un certain temps. Mais cela importe peu, à moins que nous les cassions en poussière et commencions à les manger ou à les respirer, juste pour obtenir une bonne dose d'alpha. Les gens généralement ne mangent pas des roches ou de la cire à chaussure ; il y a donc peu de raison de croire qu'ils se comporteraient différemment avec du combustible irradié. Le Dr Bernard Cohen a déclaré que : "en fait, on peut calculer qu'après 600 ans une personne devrait ingérer approximativement une demi-livre de déchets enterrés [sans compter l'uranium] pour encourir 50% de chance de mourir d'un cancer." Mais, a-t-il averti, « Une bonne histoire de peur dans les journaux semble avoir un impact bien plus grand sur l'opinion publique que plusieurs évaluations scientifiques des risques. » La présentation de la SGDN semble malheureusement soutenir les histoires de peur plutôt que la compréhension des faits.

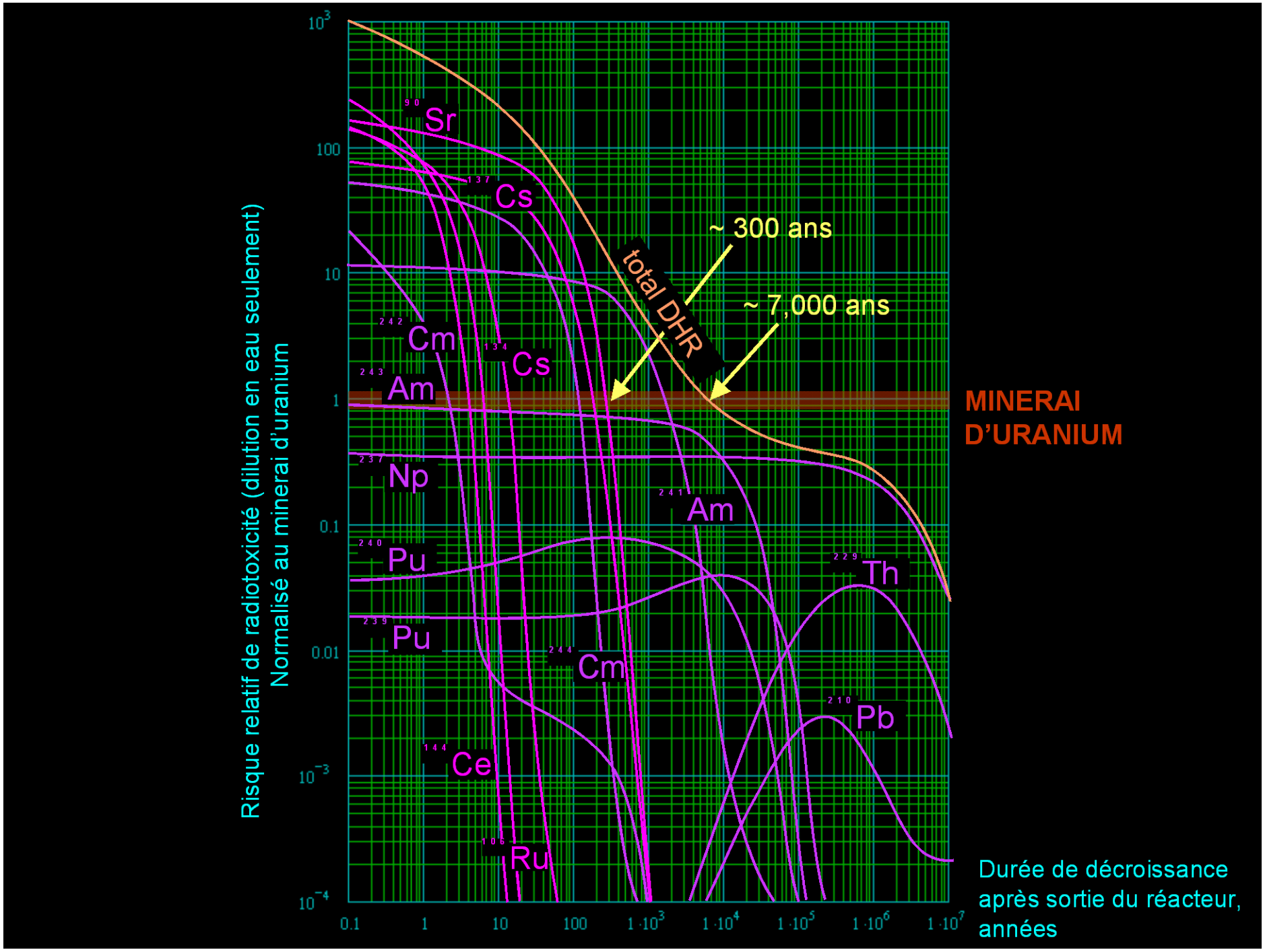
Selon le président de la Société nucléaire canadienne, le Dr Jeremy Whitlock, "sans blindage, la dose de rayonnement mesurée à une distance de 30 centimètres d'une grappe de combustible irradié CANDU, une année après sa sortie du réacteur, serait d'environ 50 - 60 Sv/h (5000 - 6000 rem/h), ce qui est mortel après une exposition de quelques minutes. Le niveau de rayonnement chute à environ 1 Sv/h après 50 ans, à 0.3 Sv/h après 100 ans, et à moins de 0.001 Sv/h (100 mrem/h) après 500 ans. Après 500 ans, le risque principal du combustible irradié n'est en plus un d'exposition externe "(voir le http://www.nuclearfaq.ca/cnf_sectionE.htm#v).

Diverses analyses prédisent la corrosion et la lixiviation des grappes de combustible irradié après plusieurs milliers d'années de stockage en profondeur. Mais les quantités sont minuscules et les taux de lixiviation extrêmement lents, comparativement au volume énorme de la roche qui se trouve au-dessus des déchets nucléaires, tout ceci donnant de très grands facteurs de dilution. Dans l'analyse SYVAC utilisée dans le rapport d'impact environnemental d'EACL qui estime les dégagements de déchets nucléaires provenant d'un dépôt géologique profond, on tient compte des incertitudes dans les propriétés supposées pour la formation de la roche dans laquelle le dépôt serait situé.

En utilisant les données de radiotoxicité fournies par l'ICRP (la Commission internationale sur la radioprotection), on obtient une image plus précise du risque sanitaire à long terme des produits de fission et des actinides contenus dans le combustible irradié - comparativement au minerai d'uranium dans le sol - comme on peut le voir dans le graphique de la page suivante.

Il est clair que, en se basant sur la radiotoxicité, la décroissance des radio-isotopes émetteurs de rayons gamma contenus dans le combustible irradié (courbes roses) jusqu'au niveau de la radioactivité du minerai d'uranium naturel se produit après environ trois siècles, alors que la décroissance de tous les déchets hautement radioactifs (DHR) incluant les actinides (courbes en violet) à part l'uranium naturel restant dans la grappe irradiée, se produit après environ 7,000 ans, et non pas des millions d'années.

janvier 2004


Risque relatif de radiotoxicité (dilution en eau seulement)
Normalisé au minerai d'uranium
10^3
100
10
1
0.1
0.01
10^{-3}
10^{-4}
0.1
1
10
100
$1 \cdot 10^3$
$1 \cdot 10^4$
$1 \cdot 10^5$
$1 \cdot 10^6$
$1 \cdot 10^7$
Durée de décroissance après sortie du réacteur, années
^{90}Sr
^{137}Cs
^{242}Cm
^{134}Cs
^{243}Am
^{237}Np
^{241}Am
^{240}Pu
^{229}Th
^{239}Pu
^{244}Cm
^{210}Pb
^{144}Ce
^{106}Ru
total DHR
~ 300 ans
~ 7,000 ans
MINERAI D'URANIUM