

L'URANIUM APPAUVRI AUJOURD'HUI EN LIMOUSIN

L'uranium appauvri est devenu ces dernières années un sujet médiatique mais il n'est jamais fait état de « l'entreposage » de Bessines. La polémique sur l'implication de l'uranium appauvri est apparue après la mort par leucémie de soldats ayant participé à la guerre des Balkans, mettant en cause l'utilisation d'obus à flèches d'uranium appauvri déjà accusés lors de la guerre du Golfe. Ce métal est choisi par les militaires pour sa dureté et la performance des flèches dans la perforation des parois des blindés. Mais lors de l'impact une très haute température est atteinte localement qui fait fondre l'uranium et les particules d'uranium formées brûlent en s'oxydant à l'air. Il en résulte une dispersion **d'aérosols d'oxydes d'uranium insolubles qui peuvent être incorporés par ingestion et inhalation**. Ces oxydes sont essentiellement U_3O_8 et UO_2 . Ce sont les effets nocifs pour la santé de ces aérosols et des dépôts au sol, l'uranium étant à la fois toxique chimique et radiotoxique, qui sont l'objet d'une controverse : sont-ils la cause des maladies et décès de soldats survenus depuis leur retour avec des procès en cours pour indemnisations des familles. Sont-ils nocifs pour la population des zones bombardées ? Il est trop tôt pour connaître les effets à long terme de l'exposition.

Or en Limousin c'est directement sous forme de poudre que l'oxyde d'uranium insoluble U_3O_8 est stocké à Bessines, stockage en surface, dans des hangars (guère plus sophistiqués que des hangars agricoles).

D'après l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) pendant la guerre des Balkans 8,6 tonnes d'uranium appauvri auraient été dispersés sur environ 10 km^2 [2]. En comparaison, au 31 décembre 2001 déjà 43 905 tonnes d'oxyde d'uranium étaient stockés sur le site de Bessines !

Dans le rapport que nous avons remis aux commissaires enquêteurs lors de l'enquête publique, nous insistions sur le peu de sérieux du dossier qui **ignorait les risques d'accidents graves**. Ceux conduisant à la formation d'aérosols et à la dispersion hors du site ont été considérés par COGEMA comme ayant une probabilité très faible et n'ont pas été pris en compte, ni chute d'avion, ni explosion, ni actes de malveillance, ni terrorisme.

Donnons quelques exemples :

- **Chute d'un aéronef** : l'« étude » a été faite par le CEPN (Centre d'étude sur l'évaluation de la protection dans le domaine nucléaire) et tient dans les phrases suivantes : « *la probabilité d'une chute d'aéronef sur les bâtiments d'entreposage est de $7,6 \cdot 10^{-8}$ accident/an soit 1 pour 13 millions d'années. Ce risque n'est donc pas pris en compte* » [souligné par moi].

Mais si un avion « tombe volontairement » (ou involontairement) la probabilité est égale à 1 ! On remarquera que le CEPN est un organisme qui a été créé en 1973 par le CEA et EDF, auxquels s'est joint COGEMA un peu plus tard, tous trois promoteurs du nucléaire.

- **Un attentat** : « *Les dispositifs mis en place, clôture du site industriel doublée par la clôture de l'entreposage, contrôles anti-intrusion, secourus électriquement, sur cette clôture ainsi que sur les bâtiments, mettent l'entreposage hors d'atteinte. Ce risque n'est donc pas pris en compte* ».

- **Surveillance du site** : le dossier COGEMA indiquait que « *la nuit et les week-ends les hangars seront fermés à clé et le dispositif d'intrusion sera renvoyé vers le poste de surveillance commun à l'ensemble du site industriel de Bessines* ».

- **Impact sur l'air** : pour montrer que la mise sous hangars est le comble de la précaution COGEMA précise qu'il n'y a aucun impact sur l'air car l' U_3O_8 « *est un produit peu volatil, qui ne contient pas de radium générateur de radon* » (donc sans risques) et qui n'en aurait pas non plus **s'il était entreposé en tas à l'air libre** : seuls seraient à craindre des envolements de poussières qui toutefois seraient très limités en raison du compactage du produit et de la densité des grains ». Dans sa volonté de démonstration Cogéma ignore ainsi la désagrégation probable au cours du temps et par action de l'humidité de ces agglomérés de poudre compactée car ce ne sont ni des monocristaux ni des frittés denses, la densité n'est pas la densité théorique 8,3 de U_3O_8 mais est comprise entre de 2 et 3,7. COGEMA ignore les actes de malveillance sur ces « tas » à l'air, les risques d'incendie qui provoqueraient des « envolements »...

Il faut souligner que l'analyse du dossier relatif à l'entreposage de Bessines révèle le laxisme des autorités administratives qui auraient dû exiger une véritable étude de sûreté et refuser la caricature fournie par COGEMA.

LA MISE EN CONFORMITE AVEC LA NOUVELLE REGLEMENTATION CONCERNANT LA PROTECTION DES PERSONNES CONTRE LES DANGERS DES RAYONNEMENTS IONISANTS.

Le nouvel arrêté du 23 décembre 2002 concerne la protection des personnes contre les dangers des rayonnements ionisants, c'est un « *modificatif à l'arrêté du 20 décembre 1995 relatif à l'exploitation de l'entreposage d'oxyde d'uranium appauvri à Bessines-sur-Gartempe* ». La limite de dose annuelle qui était de 5 mSv (5 millisieverts) au moment de la création de l'ICPE en 1995 a été remplacée par une dose annuelle de 1 mSv, légale en France depuis le 8 mars 2001. Le nouvel arrêté s'appuie sur des rapports et avis de la DRIRE et du Conseil Départemental d'Hygiène et officialise la mise en conformité avec la nouvelle réglementation française mise en place par le décret du 4 avril 2002 [3]. Il aura donc fallu 6 ans pour la mise en application de la directive européenne du 13 mai 1996 [4] qui révisait les normes de base de la radioprotection, 11 ans après les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique énoncées en novembre 1990 et publiées en 1991 (publication CIPR 60).

La limite de dose efficace annuelle à l'extérieur d'une installation en limite de site ne doit pas dépasser 1 mSv, en supplément du rayonnement naturel. Ceci est « *applicable à toute la population y compris celle résidant à proximité de l'installation d'entreposage de Bessines* ».

1- Erreurs impardonnables ou « réalisme » de la DRIRE en ce qui concerne le stockage de 199 900 tonnes de sesquioxyde d'uranium appauvri à Bessines » ?

Le nouvel article 5-11 de cet arrêté indique : « *A l'extérieur de l'installation, la somme des doses efficaces totales ajoutées reçues par une personne du public, ne doit pas excéder 1 mSv par an. ; Pour le calcul des doses un scénario réaliste de l'exposition des personnes (...) sera soumis sous un mois à compter de la notification du présent arrêté à l'approbation de l'inspection des installations classées. Ce scénario doit être conforme à la méthode d'évaluation de l'impact des sites de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium élaborée par l'IPSN (rapport DPRE/SERG 01-53 de novembre 2001 (...))* » [C'est moi qui souligne].

Cet arrêté préfectoral s'appuie sur les rapport et avis de la DRIRE du 29 octobre 2002. On ne peut que rester perplexe à la lecture de ce rapport de l'inspecteur général des installations classées, dont communication a été faite au Conseil Départemental d'Hygiène le 19 novembre 2002.

- Comment peut-on expliquer que la DRIRE utilise le rapport de l'IPSN (désormais IRSN, Institut de Radioprotection et Sûreté Nucléaire) intitulé « *Méthode d'évaluation de l'impact des sites de stockage de résidus de traitement de minerais d'uranium* » pour évaluer, à Bessines, l'impact du stockage d'uranium appauvri sous forme de sesquioxyde d'uranium U_3O_8 ?

Rappelons que dans le cas du minerai c'est toute la chaîne de désintégration de l' U_{238} et ses 14 descendants jusqu'au plomb 206 qui est à considérer et pour celle de l' U_{235} c'est toute la chaîne jusqu'au plomb 207. Dans le cas des résidus de traitement de minerais d'uranium il subsiste les radionucléides non extraits par le traitement, dont le radium générateur de radon (l'activité des résidus est environ 72% de la radioactivité initiale) [5].

Tout cela n'a rien à voir avec le cas de l'uranium appauvri (UA) élaboré à Pierrelatte sous forme d' U_3O_8 et stocké à Bessines. L'uranium appauvri de Bessines comprend **7 radionucléides** : U_{238} , U_{235} , U_{234} , U_{236} [voir plus loin ce qu'implique la présence d' U_{236}] mais aussi les descendants à vie courte de U_{238} et U_{235} rapidement en équilibre avec leur géniteur qui sont : 2 descendants pour U_{238} à savoir Th_{234} (Thorium 234) et Pa_{234} (Protactinium 234) et un descendant Th_{231} (Thorium 231) pour U_{235} . Ces descendants à vie courte ne sont pas pris en compte par COGEMA [6].

- Dans le rapport de l'Inspecteur des Installations Classées [7] il y a un chapitre dont le titre est « *Bilan montrant le respect des prescriptions de l'arrêté préfectoral du 20 décembre 1995* » avec un sous-titre « *surveillance radiologique* » comportant 4 paragraphes : l'air, l'eau, bioindicateurs, dose efficace ajoutée.

Au paragraphe **Bioindicateurs** le rapport indique que « *Les contrôles réalisés en 2000 ont mis en évidence une augmentation des activités en uranium et en radium des mâts (partie des végétaux comprise entre les racines et les feuilles) prélevés en limite EST de l'installation (...)* » [c'est moi qui souligne]. Il est suggéré que les variations observées proviennent des conditions de prélèvement et que « *en 2001 les contrôles donnent des valeurs du même ordre de grandeur que celles relevées en 98 et 99* ». Or le point important, outre la possible augmentation, c'est le fait qu'on ait trouvé de l'uranium et du radium en 1998 et les années suivantes. Pour trouver de l'uranium il faudrait qu'il y ait eu une brèche sur un container d'oxyde d'UA et un épandage jusqu'à l'Est du site. Or rien de ce genre n'a été signalé. Mais du radium ? Il ne peut pas provenir de l'installation actuelle.

Les commissaires enquêteurs avaient signalé la nécessité de procéder au réaménagement du site avant toute nouvelle installation de stockage. A la date de remise de leurs conclusions en mars 1995 le Préfet n'avait pas encore donné son accord au plan de réaménagement. (L'arrêté préfectoral relatif au réaménagement du site industriel de Bessines est du 13 décembre 1995 et l'autorisation d'entreposage du 20 décembre).

La COGEMA précisait « *dans tous les cas, l'objectif principal de ce réaménagement est de revenir pratiquement à l'état topographique initial et de s'assurer de l'absence d'impact radiologique résiduel (...)* ».

Le fait de trouver du radium et de l'uranium dans des végétaux prouve que COGEMA a contaminé le site de Bessines lors de l'exploitation des mines d'uranium et du traitement de minerai, qu'elle a créé l'installation d'entreposage sans réaménager le site d'une façon satisfaisante et que la DRIRE a laissé faire. Comment s'est donc effectué ce « réaménagement » du site COGEMA et sa gestion des résidus issus de l'extraction et du traitement des minerais d'uranium à la fin des activités minières à Bessines ? Quels contrôles ont été effectués par la DRIRE sur la qualité du « réaménagement » ? **Ce radium ne peut pas provenir du stockage d'uranium appauvri.**

Mais évidemment il est raisonnable de penser que la DRIRE est réaliste et que, dans l'intérêt de la population **il vaut mieux, et il faut, que les mesures soient effectuées et continuent à l'être** car elles montrent qu'il y a du radium. Les végétaux, l'eau doivent être contrôlés. L'arrêté préfectoral laisse supposer que le scénario de contrôle est adapté à la nouvelle installation, celle d'oxyde d'uranium appauvri. Ceci doit être élucidé car tout le scénario de surveillance de l'IPSN inclus dans l'arrêté préfectoral s'applique en fait au réaménagement du site qui doit se poursuivre et pas à celui de l'entreposage.

2- Classement de l'installation : la législation au service de COGEMA. Le stockage aurait dû être une INB en tenant compte des descendants à vie courte de U238 et U235.

L'autorisation porte sur 199 900 tonnes d'oxyde U_3O_8 représentant 169 515 tonnes d'uranium, l'activité maximale étant de 96 630 Ci (3575 téraBecquerels, TBq).

Avec les lois de la physique le stockage aurait dû être une installation nucléaire de base. Mais pour tous les problèmes résultant de l'exploitation des mines d'uranium les associations se sont battues pot de terre contre le pot de fer COGEMA (voir l'audit Birraux [5]).

COGEMA se réfère à l'avis du Conseil d'Etat du 11 décembre 1991 où en matière de calculs d'activité pour l'uranium et le thorium naturels on ne tient compte que de l'activité des têtes de série à l'exclusion de leurs produits de filiation. En l'appliquant à l'uranium appauvri il n'est donc pas question de Th234, Pa234 descendants de U238, et de Th231 descendant de U235. Mais l'application stricte de cet avis reviendrait aussi à supprimer dans le calcul l'activité de U234 très radiotoxique qui descend de U238. Et COGEMA d'indiquer que son calcul d'activité est un calcul maximaliste [sic] puisqu'il tient compte de U234 et aussi de l'impureté U236 qui est tête de série [6].

Pour déterminer l'activité du stockage COGEMA peut se baser sur le décret, postérieur à sa demande d'autorisation, du 11 mars 1996 (n°96-197) qui spécifie que l'uranium appauvri ne doit pas être considéré comme un mélange de radionucléides (à condition que le rapport U234/U238 ne soit pas supérieur à 1).

On ne tient compte que de l'activité alpha et non de l'activité totale ce qui revient à dire qu'un becquerel bêta n'a pas d'existence et qu'on ignore une bonne partie des rayons gammas. Voilà qui donne entière satisfaction à COGEMA au détriment de la protection de la population.

COGEMA reconnaît qu'elle ne tient pas compte des radioéléments à vie courte « *même s'ils sont effectivement présents du fait de leur courte période* ». Et COGEMA d'ajouter « *Remarquons par ailleurs que ces descendants à vie courte sont également présents dans l'uranium des minerais naturels et que le fait de les comptabiliser dans le calcul de ces derniers conduirait à rendre illégale, par défaut de classement, toute manipulation liée à leur extraction* ». En somme c'est reconnaître que toute l'activité minière s'est faite en dehors de considérations de la radioactivité réelle.

Et COGEMA précise qu'on reste bien dans une installation classée pour la protection de l'environnement même en considérant qu'il y a un mélange d'U236 et d'uranium appauvri classé dans le groupe 4 de radiotoxicité, le moins radiotoxique [6].

Tout l'ensemble est incohérent car COGEMA est obligée de tenir compte des descendants à vie courte :

- dans le calcul de la **dose externe** mesurée à la clôture, les rayonnements alpha ne participent pas à l'exposition. Les rayonnements **gamma** émis par les radionucléides non pris en compte par COGEMA dans ses calculs d'activité participent largement à l'irradiation des dosimètres thermoluminescents de contrôle. Les évaluations COGEMA manquent ainsi de cohérence interne. (Remarquons que COGEMA n'a pas indiqué sa méthodologie).

Dans le rapport de la DRIRE [7] il a été noté une augmentation de l'exposition externe entre 1999 et 2000 dans la zone d'arrêt des convois. Quel a donc été le débit de dose mesuré en limite de site et à l'intérieur du site alors que 25 convois sont arrivés en 1999 et 48 en 2000 ?

- dans ce même rapport, au chapitre consacré à la « *Surveillance radiologique* » il est indiqué que des détecteurs de contamination surfacique contrôlent le rayonnement alpha et bêta. Or les seuls émetteurs bêta sont le Th 234, le Pa234, le Th231 descendants à vie courte de l'U238 et U235. Pourquoi ne pas en tenir compte dans l'activité du stockage ? Est-ce à dire qu'un becquerel « bêta » n'a aucune action biologique en rayonnement externe ou fixé sur la peau, ou d'action sur les cellules s'il est inhalé ou ingéré ?

- Il est indiqué que pour les sédiments l'U238 est mesuré indirectement par spectrométrie gamma du protactinium Pa 234 alors que celui-ci n'existe pas administrativement pour le classement de l'installation.

L'activité totale du stockage dépasse les 100 000 curies.

La demande initiale de COGEMA portait sur un stockage de 265 000 tonnes d'oxyde U_3O_8 que l'administration a baissé à 199 900 tonnes en tenant compte de la composition isotopique *maximale* de l'hexafluorure d'uranium à partir duquel est élaboré l'oxyde à l'usine W de Pierrelatte (correspondant à 169 575 tonnes d'UA). La composition isotopique maximale serait la suivante, d'après le rapport de l'inspecteur des installations classées :

U234 0,0035% ; U235 0,5% ; U236 0,01% ; U238 99,4865%. COGEMA indique que pour cette composition l'activité serait de 21107 Bq par gramme. Nos calculs indiquent bien $21,1 \cdot 10^3$ Bq/g pour l'activité alpha de U238, U235, U238 et U236 mais donnent $46,2 \cdot 10^3$ Bq/g pour l'**activité totale** avec les descendants à vie courte ce qui est plus du double, un facteur 2,19 ! (Voir Annexe I). Ainsi pour le tonnage final de 169 515 tonnes d'uranium et une activité alpha de 3 575 TBq l'activité est 96 630 Ci, inférieure à 100 000 Ci, valeur dont le dépassement ferait basculer l'installation dans la catégorie des INB. Or **l'activité réelle totale est de 7 832 TBq soit 211 665 Ci.**

Remarque : le texte COGEMA intitulé « *De la sous-estimation des teneurs pour stocker le maximum de produit en dessous du seuil INB et des différences de calcul* » [8] laissait supposer que la concentration isotopique moyenne de Pierrelatte étant inférieure à la concentration maximale, le tonnage final de Bessines ne représenterait que 72 892 Ci. Le rapport de la DRIRE du 31 octobre 2002 comporte la date d'arrivée des convois, le nombre de containers, le tonnage en U_3O_8 d'où est déduit le tonnage en U et l'activité totale. Si l'on calcule l'activité massique moyenne (alpha) de chaque convoi elle correspond sensiblement à la composition isotopique maximale de l'usine W de Pierrelatte, $21,1$ kBq/g définie par l'arrêté d'autorisation.

S'agit-il d'une activité mesurée par l'exploitant ou de l'application par la DRIRE de l'autorisation préfectorale en multipliant le tonnage par l'activité massique légale? Or il est nécessaire, non seulement de connaître l'activité de chaque container et sa composition, mais étant donné que le contenu d'un container provient du mélange de différentes préparations, d'avoir les activités de chaque partie du mélange. C'est la seule façon de connaître la teneur réelle en impureté U236.

3- COGEMA, le calcul des doses et l'optimisation de l'installation du point de vue de la protection radiologique du public : où donc a été appliqué le concept de la « contrainte de dose » ?

Dans le rapport de la DRIRE du 19 novembre 2002 la dose efficace ajoutée en limite du site est de 0,4 mSv/an pour une personne du groupe de référence.

Nulle part, ni dans les dossiers COGEMA ni dans ceux de la DRIRE, il n'est fait mention de l'application de la « contrainte de doses » pourtant explicitement définie dans l'article 7 de la Directive européenne de 1996 :

« Des contraintes de dose devraient, le cas échéant, être utilisées dans le cadre des efforts visant à assurer l'optimisation de la protection radiologique ». Cette phrase sibylline doit être mise dans son contexte : elle est conforme à la recommandation de la CIPR 60 « *une des caractéristiques de la réglementation des pratiques est l'utilisation de contraintes liées à la source devant être appliquées pour l'optimisation de la protection* » (art.238). Ici une « pratique » (*practice* en anglais) est une activité industrielle, l'installation qui génère l'exposition aux radiations. La contrainte de dose vise à restreindre la dose liée à la source dans un souci de radioprotection des individus.

Un individu peut être exposé à différentes sources provenant de « pratiques » différentes, c'est pourquoi est introduite la notion de contrainte de dose pour une « pratique » donnée. Claude Birraux indique que l'autorité de radioprotection du Royaume-Uni, le National Radiological Protection Board, retient une contrainte de dose annuelle de 0,3 mSv par « pratique ». Ainsi la limite de dose annuelle

de 1 mSv ne devrait être qu'exceptionnellement atteinte car selon le Pr. Clarke du NRPB « *c'est la frontière inférieure pour le niveau inacceptable de risque imposé, c'est à dire non volontaire. Ainsi, toute source unique doit être contrainte pour que les membres du public ne reçoivent pas plus qu'une fraction de millisievert* » [9].

Ceci est appliqué dans d'autres pays que le Royaume-Uni comme en Allemagne, en Lituanie, aux USA.. Incidemment, dans un rapport des Nations Unies consacré à la guerre au Kosovo, il est indiqué, en ce qui concerne les limites de doses pour « l'action ou la non-action » du point de vue radiologique « *Action and non-action values (radiological)* » :

- Pas d'action si la dose est inférieure à 10 microsievert par an

- Planification d'une limite de dose efficace de 0,1 mSv/an pour le public, c'est à dire que la pratique doit être programmée pour délivrer des doses (très) en dessous de cette valeur. « *planning dose limit for the public for a given source 0.1 mSv per year effective dose to the public i.e the practice shall be planned to give doses (far) below that value* » [10].

Selon la CIPR l'optimisation de la protection radiologique doit se faire dès la conception d'une nouvelle installation. Il ne suffit pas d'avoir une protection collective optimisée basée sur les avantages et les détriments d'une pratique car cela peut entraîner des inégalités entre individus, certains étant protégés, d'autres pas, mais d'avoir aussi le souci de réduire ces inégalités en limitant la dose individuelle par des restrictions de dose liées à la source (ou contraintes de dose). Pour des groupes homogènes d'individus les plus exposés par rapport à une source (groupes critiques) la contrainte de dose doit s'appliquer à la dose moyenne du groupe.

L'OXYDE D'URANIUM APPAUVRI DU LIMOUSIN EST MOINS APPAUVRI QUE CELUI DES MUNITIONS. LA PRÉSENCE D'URANIUM 236.

Si la DRIRE se base sur un rapport de l'IRSN pour « contrôler » COGEMA il y a aussi des rapports IRSN concernant l'uranium appauvri utilisé dans les armes [11] dans lesquels on peut voir que pour comparer l'activité spécifique (nombre de becquerels par gramme, dite aussi activité massique) de l'uranium naturel et de l'uranium appauvri des armes l'IRSN calcule l'activité alpha mais aussi l'activité totale et dans les deux cas tient compte des descendants à vie courte de l'uranium (indiqué par : « avec ses descendants entre U238 et U234 »).

Les compositions isotopiques étudiées sont les suivantes :

Composition isotopique de l'uranium naturel (en poids)

U238 99,274% ; U235 0,720% ; U234 0,0055%. (L'activité de U234 est égale à celle de U238)

Composition isotopique de UA

U238 99,797% ; U235 0,202% ; U234 0,0008%

Ainsi l'activité alpha de l'uranium naturel est de $25,2 \cdot 10^3$ Bq/g pour l'uranium naturel. Quant à l'activité totale, y compris les descendants à vie courte, elle est de $50,4 \cdot 10^3$ Bq/g. Pour l'UA des armes étudié par l'IRSN l'activité alpha est $14,4 \cdot 10^3$ Bq/g et l'activité totale $39,3 \cdot 10^3$ Bq/g.

L'uranium appauvri est un résidu résultant de l'enrichissement en U235 (fissile) de l'uranium naturel. Pour cet uranium appauvri considéré par l'IRSN, U235 et U234 ont considérablement baissé mais la teneur en U236 n'est pas donnée. Un article de la Royal Society [12] donne les teneurs suivantes pour l'UA des munitions utilisées dans les Balkans, de teneurs proches de celles de l'IRSN, y compris une teneur en U236 :

U238 99,8% ; U236 0,0003% ; U235 0,2% ; U234 0,001% (le total ne fait pas 100%) et correspond à une activité alpha de $14,9 \cdot 10^3$ Bq/g et une activité totale de $39,9 \cdot 10^3$ Bq/g).

Comparons avec l'UA stocké à Bessines : il est moins appauvri que celui des munitions

Pour la composition moyenne de l'U appauvri de Bessines les concentrations en poids sont les suivantes :

U238 99,6976% ; U236 0,0010% ; U235 0,30% ; U234 0,0014% ; correspondant à une activité alpha de $15,9 \cdot 10^3$ Bq/g en accord avec les calculs COGEMA et une activité totale de $40,9 \cdot 10^3$ Bq par gramme.

Pour la composition isotopique maximale de Pierrelatte la composition est :

U238 99,4865% ; U236 0,01% ; U235 0,50% ; U234 0,0035%. L'activité alpha est de $21,1 \cdot 10^3$ Bq/g et l'activité totale $46,3 \cdot 10^3$ Bq/g.

Ainsi l'uranium stocké à Bessines est moins appauvri que celui des armes ce qui se voit facilement sur la concentration de U235. Il est aussi plus riche en radioélément U234 le plus radiotoxique, et aussi en U236.

Dans l'Annexe I où sont données les activités massiques en Bq/g pour chacun des isotopes U234, U235, U236, U238, et pour l'UA à la concentration maximale de Pierrelatte et à la concentration moyenne, nous avons indiqué aussi celle de l'UA des munitions étudié par la Royal Society.

On peut voir ainsi que la contribution alpha de U234, radioélément le plus radiotoxique, est beaucoup plus importante dans l'UA de Bessines. C'est le cas non seulement pour la concentration maximale de Pierrelatte mais même pour la composition moyenne. Activité alpha et activité totale sont plus importantes pour l'UA stocké à Bessines que dans les munitions.

La DRIRE considère-t-elle que l'uranium appauvri de Bessines qui est directement sous forme d'oxyde d'uranium en poudre (et peu soluble) est moins radioactif selon la version COGEMA et donc moins nocif que l'uranium appauvri des armements ? Et en plus il y a de l'U236...

La présence de U236 et l'uranium issu du retraitement

COGEMA a admis la présence de U236 dans les containers, autorisé selon ses dires, par la réglementation commerciale internationale. (Rien n'indique dans la législation que des règlements commerciaux peuvent être invoqués pour justifier une pratique). En effet les containers sont des containers réutilisés et peuvent contenir U236 en impureté. Il faudrait donc que pour chacun d'eux soit connue la composition en oxydes d'uranium et la teneur des différents isotopes de l'uranium y compris en U236. Mais cela ne suffit pas car s'il y a de l'U236 c'est la signature que par ce container a transité de l'uranium issu du retraitement de combustible usé. On ne peut donc pas exclure la présence de traces de plutonium (Pu) et de produits de fission et d'activation.

En effet, que du plutonium puisse être présent dans l'uranium appauvri des armements cela a été reconnu par des officiels français de la radioprotection. Par exemple par Jean-François Lacronique, alors directeur de l'Office de Protection contre les Rayonnements Ionisants lors d'une interview par Marlise Simons publiée par le *New York Times* (17 janvier 2001) où il a déclaré « *Pour avoir un cancer par de l'uranium appauvri il faut avoir été exposé pendant longtemps à de grandes quantités. Mais l'U236 change l'équation car il provient du combustible usé qui a été retraité. Nous avons désormais le devoir de voir si d'autres contaminants du combustible usé sont présents tels que le plutonium ou l'américium qui sont beaucoup plus nocifs* ».

Mais qu'en est-il de l'uranium appauvri civil dont personne ne se soucie ? Il se pourrait même qu'il y ait davantage de Pu dans l'Uranium appauvri (UA) provenant du retraitement des combustibles usés du nucléaire civil que de l'UA provenant des installations militaires car le combustible civil reste plus longtemps en réacteur !

Il est indispensable de savoir si la présence d'U236 et d'autres contaminants ont été **recherchés** à Pierrelatte pour chaque container déjà à Bessines.

ET SI PAR MALHEUR UN AVION SE CRASHAIT SUR LE STOCKAGE ?

Nous avons fait remarquer en 1994 que les données sur les caractéristiques physico-chimiques des poudres, pourtant très importantes en cas d'accident, étaient insuffisantes. Aucune donnée complémentaire n'a été fournie par COGEMA. Il se trouve que la question de la taille des particules est fondamentale en cas de risque d'inhalation.

Nous avons vu que les commissaires - enquêteurs ont été choqués par la négation systématique du danger dans le dossier COGEMA.

Pour COGEMA le seul accident envisageable est l'épandage de 230 kilos d'U₃O₈ suite à l'éventration d'un container par la fourche du chariot élévateur à l'extérieur du bâtiment, faisant une brèche de 10 cm sur 30 cm. L'évaluation fait intervenir la convection et il en résulte que la mise en suspension des particules d'oxyde est réduite d'un facteur 1000 ce qui conduit à un « terme-source maximaliste » de 230 grammes. D'après les calculs COGEMA, à la clôture du site située à 170 mètres, distance minimale d'un bâtiment d'entreposage), la quantité dispersée par un vent de 5 m/s (18 km à l'heure) et inhalable serait de 0,19 microgramme par gramme répandu soit 44 microgrammes (0,00044 grammes) pour le terme source de 230 grammes. Si on se fie à l'évaluation de l'impact sanitaire faite par COGEMA (page 119/132 du dossier d'enquête) la dose efficace engagée serait de 0,031 millisievert, très inférieure aux 5 mSv, limite annuelle réglementaire de l'époque. Mais que se passerait-il dans le cas d'un crash d'avion sur le site d'entreposage qui disperserait hors hangars plus d'une dizaine de tonnes et pas 230 grammes ? Un facteur de l'ordre de 40 000 pour 10 tonnes ? Il y aurait syndrome d'irradiation aiguë et intoxication rénale.

Lors de l'enquête publique nous avons indiqué cette possibilité. Or COGEMA n'en a pas tenu compte car, pour elle, la probabilité d'occurrence était considérée comme trop faible. En plus d'un crash accidentel la survenue de l'acte terroriste du 11 septembre 2001 à New York montre qu'on ne peut

négliger les actes de malveillance. Les actes de terrorisme ou de malveillance ne relèvent pas d'une approche probabiliste. Il faudrait revoir toute l'étude COGEMA et ses insuffisances...

Nous nous étions basés sur une étude COGEMA de 1987 faite pour l'**enquête publique de Miramas** où le stockage avait été prévu initialement et où étaient présentées les situations non seulement en fonctionnement normal mais aussi en situation accidentelle. Pour la situation accidentelle il était ajouté : « *(par exemple dans le cas d'une chute d'avion)* ».

C'est l'Institut de Mécanique des Fluides de Marseille qui avait fait les calculs dans le cas d'une chute d'avion (mais d'un avion militaire, pas d'un gros porteur de l'aviation civile !) avec l'hypothèse d'une émission de 10 tonnes d' U_3O_8 à l'altitude de 20 mètres sous forme d'un aérosol de grosses particules de 200 microns (moins pénalisantes vis-à-vis des risques d'inhalation que des particules de quelques microns). Avec une vitesse de vent de 72 km/heure il était indiqué une concentration dans l'air à 550 mètres du site de $2 \cdot 10^{-5}$ millicuries par m^3 soit 740 Bq / m^3 .

La dose efficace annuelle pour la population est de 1 mSv. Pour atteindre cette limite annuelle d'incorporation (LAI) par inhalation il suffit qu'un adulte inhale 117 Bq d'UA. S'il inhale 1 m^3 d'air par heure à 550 m du site avec une concentration de 740 Bq/ m^3 la LAI serait atteinte en moins de 10 minutes. Pour un enfant de 2 ans la LAI est de 38 Bq d'UA, ce qui correspond environ à seulement 1,8 milligramme d'U appauvri ! (Voir l'Annexe II).

Les risques potentiels d'une chute d'avion auraient dû faire partie du dossier.

Le scénario de l'Institut de Marseille n'impliquait **que** 10 tonnes d'oxyde à grosses particules or, avec le crash d'un Boeing (qui pourrait être « délibéré »), l'explosion et l'incendie entraîneraient la dispersion de poudre de **plusieurs** containers et ainsi, même avec des vents plus faibles (10-18 km /heure) la contamination serait très importante. On ne sait pas ce qu'il adviendrait réellement des caractéristiques physico-chimiques des poudres. Après l'incendie l'aérosol résultant pourrait être constitué de particules de quelques microns, plus fines que celles envisagées par l'Institut de Marseille et d'autant plus dangereuses une fois inhalées.

Enfin avec la possibilité d'un tel accident il est nécessaire d'envisager la contamination durable des sols, celle des productions agricoles, des pâtures, celle de l'eau de boisson.

QUELQUES REMARQUES A PROPOS DES EFFETS SUR LA SANTÉ

L'uranium est radiotoxique et c'est un toxique chimique :

On sait depuis longtemps que l'uranium, en plus d'être cancérigène, est aussi un toxique chimique qui attaque les reins et nécrose les artères comme la plupart des métaux lourds. Comme toxique chimique c'est l'uranium ingéré qui est à craindre en ingestion aiguë.

L'impact sur la santé va dépendre de la solubilité des composés chimiques à base d'uranium et donc des propriétés physico-chimiques en particulier de la surface spécifique des particules inhalées. Dans le cas de Bessines il s'agit d'oxydes insolubles U_3O_8 et aussi UO_2 (de l'ordre de 200 kg par container) et l'on ne sait pas comment ils évolueraient en cas d'incendie et comment évoluerait leur solubilité à plus ou moins long terme sur le sol.

Mais les fluides du corps peuvent finir par solubiliser en partie ces particules fixées dans les poumons, elles passent dans le sang, le tractus gastro-intestinal, irradiant le foie, se fixant dans les ganglions lymphatiques, sur les surfaces osseuses et irradiant la moelle osseuse, pouvant être à l'origine de leucémies et de cancers radioinduits sur les autres organes. Les organes de rétention sont les reins et les surfaces osseuses.

La polémique est vive au sujet des vétérans mais n'est-ce pas parce qu'elle met en cause la radiotoxicité de l'uranium qui est généralement considérée comme étant « faible » ?

Un point qui intéresse particulièrement le Limousin : s'il est bien indiqué dans le document IRSN [11] que pour les études concernant les mineurs d'uranium « *dans la quasi totalité de ces études, il n'y a pas eu de mesures individuelles d'exposition aux poussières d'uranium ; en conséquence, les dépôts pulmonaires de l'uranium ainsi que ses effets directs n'ont pas pu être évalués* » la suite est plus surprenante. « *Pour estimer les risques de cancer autres que celui du poumon (leucémie en particulier), une étude conjointe de l'ensemble des études sur les mineurs a été menée : elle n'a pas pu démontrer une relation entre le risque de leucémie et une exposition prolongée dans les mines* ».

Il nous faut donc rappeler que les premières études sur les mineurs d'uranium effectuées par CEA/COGEMA montraient, outre un excès de morts par cancer du poumon, un excès de mortalité par cancers du larynx, estomac, os, cerveau et leucémies. A partir des publications CEA, Roger Belbéoch [13] avait calculé la probabilité pour qu'un décès par cancer soit professionnel. Pour la leucémie elle était de 71%, 80% pour le poumon et les os, 82% pour le larynx, 78% pour le cerveau, 67% pour l'ensemble des cancers.

R. Belbéoch soulignait que la recherche d'une population de référence représentative du groupe étudié est fondamentale pour estimer correctement le risque qu'il a subi. Il semble bien que cette notion soit restée étrangère à bon nombre de nos épidémiologistes car dans le même rapport IRSN juste après les mineurs on lit : « *Les études sur les travailleurs exposés au cycle du combustible à usage civil et à usage militaire ont montré une mortalité, toutes causes confondues, inférieure à la population générale* » ce qui pourrait laisser croire que l'uranium est même bénéfique !

Or l'étude de mortalité par cancer d'un groupe de 121 travailleurs sur uranium du Centre d'études nucléaires de Saclay a montré que la mortalité toutes causes confondues était très inférieure à la mortalité nationale : 0,4 au lieu de 1. En effet les travailleurs sont soumis à une sélection à l'embauche sur des critères de santé ce que les anglo-saxons appellent « the healthy worker effect ». Par contre la mortalité par cancer dans ce groupe de travailleurs était très supérieure à la moyenne nationale, en particulier pour les cancers des os [14]. Or les os et les reins sont considérés comme étant des organes de rétention pour l'uranium (mais pour des composés solubles ou moyennement solubles). Quand une étude officielle a été lancée tous ces effets ont disparu : il a suffi de « diluer » le groupe à risque par l'adjonction d'un nombre important de travailleurs ayant été embauchés plus tard ou n'étant pas directement affectés à un travail sur uranium.

Il est scandaleux que tous les travailleurs de groupes à risque, après avoir travaillé dans de mauvaises conditions de radioprotection nuisibles à leur santé, n'aient pas été répertoriés pendant que la mémoire de ces groupes existe encore, qu'il n'y ait pas eu d'études spécifiques comme celle des travailleurs de l'usine du Bouchet qui ont eu du mal à se recaser à Saclay après la fermeture de l'usine en 1971 parce que leur état de santé n'était pas satisfaisant. Que sont devenus les travailleurs qui ont fritté de grandes quantités d'oxyde d'uranium dans des sous-sols mal ventilés de Saclay, ou ceux ayant travaillé sur les carbures d'uranium ? Quelle est la santé de leurs enfants ?

Tous ces travailleurs « mixés » avec les autres permettent de dire que les travailleurs du nucléaire n'ont pas subi de risque et que l'uranium n'est que faiblement radioactif. Or les exemples ne manquent pas de travailleurs sur composés d'uranium qui sont malades car dans les centres de production la radioprotection est moins bien assurée que dans les centres de recherches.

Il y a fort à parier que les soldats et leurs familles auront du mal à faire valoir leurs droits tout comme c'est la croix et la bannière pour faire reconnaître un travailleur en maladie professionnelle.

La discussion est vive car certains scientifiques pensent que les particules insolubles, lorsqu'elles sont inhalées, peuvent rester longtemps dans les poumons et les ganglions trachéo-bronchiques avec irradiation par les particules alpha et création de points chauds en particulier dans le cas des vétérans où les caractéristiques physico-chimiques les rendent très insolubles [15].

On ne connaît pas bien les effets neurotoxiques mais certains spécialistes considèrent que les composés d'uranium ont un effet sur l'hémisphère frontal gauche du cerveau [16].

Enfin il faudrait que nos experts admettent qu'on ne connaît pas tout sur les effets des rayonnements notamment sur la contamination interne, d'autant plus que ces experts officiels semblent ignorer les études qui mettent en évidence les effets du rayonnement et de la radiotoxicité de l'uranium en particulier.

Des faits nouveaux sont apparus dernièrement. Ainsi depuis quelques années on admet que les particules alpha induisent des instabilités chromosomiques sur les cellules qui se transmettent aux cellules-filles et que cela pourrait favoriser le développement de leucémies [17]. D'autre part il y aurait des effets non seulement sur le noyau de la cellule irradiée mais aussi des effets collatéraux sur les cellules proches de la cellule irradiée, ce qu'on appelle le « bystander effect » [18].

Cette évidence de déficit de connaissances devrait inciter les responsables administratifs à la prudence (principe de précaution) dès la conception de nouvelles installations, ce qui n'est pas le cas malheureusement, comme le montre si bien le stockage de Bessines.

CONCLUSION

Tous les dangers ont été minimisés ou n'ont pas été pris en compte par COGEMA lors de sa demande d'autorisation. Les actes de malveillance non plus. Qu'en est-il aujourd'hui ?

Y a-t-il un plan spécifique pour Bessines comme ceux introduits autour des sites nucléaires français après le 11 septembre 2001 ? L'étude d'impact pour un accident affectant un avion de ligne a-t-elle été effectuée ? Est-elle dans un tiroir ? Les effets sanitaires ont-ils été intégrés y compris ceux à long terme résultant de la contamination du sol et de l'eau ?

La population doit-elle admettre qu'elle fera partie d'une cohorte épidémiologique pour les études à venir sur les effets biologiques de l'oxyde d'uranium appauvri ?

Il faut déplacer ce stockage sur un terrain militaire.

Annexe I
Activité alpha et activité totale d'1g d'UA

Nature des différents Isotopes	Activité massique (Bq/g) Valeurs COGEMA	Concentration moyenne en % pour 1g UA	Contribution à l'activité pour 1g d'UA conc.moyenne (Bq/g)	Concentration maximum de Pierrelatte % pour 1g UA (Bq/g)	Contribution à l'activité pour 1g UA conc.maximale (Bq/g)
U234	231 190 918	0,0014	3 237	0,0035	8 092
U235	79 974	0,3000	240	0,50	400
U236	2 393 132	0,0010	24	0,01	2 39
U238	12 439	99,6976	12 401	99,4865	12 375
Activité alpha (Bq/g) (U234 + U235 + U236 + U238)			15 902		21 106
Activité totale =					
Activité alpha+			15 902		21 106
Activité Th234+			12 401		12 375
Activité Pa234+			12 401		12 375
Activité Th231			240		400
Activité totale (Bq/g)			40 944		46 256

Pour l'UA de l'article de la Royal Society, l'activité alpha est de 14 897 Bq/g et l'activité totale 39897 Bq/g. La contribution de U234 est nettement moins importante que celles de l'UA de Bessines même pour la composition moyenne. Les contributions à l'activité d'1g d'UA sont les suivantes :

U234 : 2 310 Bq

U235 160 Bq = Th231

U236 7 Bq

U238 12 420 Bq = Th234= Pa234

Annexe II

La dose par unité d'incorporation (DPUI en Sv/Bq) varie peu entre les 4 isotopes 238, 236, 235, 234, la plus basse pour U238 et la plus élevée pour U234. Par inhalation d'oxydes insolubles le DPUI varie entre 8.10^{-6} Sv/Bq et $9,4.10^{-6}$ Sv par Bq inhalé pour les adultes (respectivement 8,0 ; 8,7 ; 8,5 ; 9,4 pour les isotopes 238, 235, 236, 234) alors que le DPUI est voisin de $4,5.10^{-8}$ pour l'ingestion (dans le même ordre que précédemment 4,5 ; 4,7 ; 4,7 ; 4,9).

Pour les enfants dans la classe 1-2 ans le DPUI est 3 fois plus élevé que pour les adultes par inhalation et 2,7 fois plus élevé par ingestion.

Nous avons calculé quelles étaient les limites annuelles d'incorporation par inhalation d'oxydes insolubles (UO₂ et U₃O₈) pour une dose efficace annuelle de 1 mSv en fonction des différentes classes d'âge, pour la composition moyenne et la composition maximale de Pierrelatte qui correspond à l'arrêté préfectoral. Nous indiquons également (entre parenthèses et en italiques) à combien de milligrammes d'UA elles correspondent.

Limites annuelles d'incorporation par inhalation en fonction de l'âge

Composition UA	< 1an	1-2 ans	2-7 ans	7-12 ans	12-17 ans	>17 ans
Maximale	32,8 Bq <i>(1,6 mg)</i>	37,8 Bq <i>(1,8 mg)</i>	58,5 Bq <i>(2,8 mg)</i>	93,2 Bq <i>(4,4 mg)</i>	108,9 Bq <i>(5,2 mg)</i>	117,5 Bq <i>(5,6 mg)</i>
Moyenne	33,5 Bq <i>(2,1 mg)</i>	38,9 Bq <i>(2,4 mg)</i>	60,4 Bq <i>(3,8 mg)</i>	96,5 Bq <i>(6,1 mg)</i>	111,8 Bq <i>(7,0 mg)</i>	121,1 Bq <i>(7,6 mg)</i>

Un air est considéré comme très empoussiéré s'il referme 1g de poussières par m³. Un scénario de l'UNEP [10] envisage 10% de UA soit 100 mg d'UA/m³. En 1 heure la dose efficace d'un adulte serait

respectivement de 18 mSv et 13 mSv pour les concentrations maximale et moyenne. Il y aurait intoxication chimique aiguë.

Références

[1] L'association ADEPAL ayant saisi le Tribunal administratif de Limoges celui-ci annulait l'autorisation au motif que l'uranium appauvri était un déchet radioactif et ne respectait pas la loi sur les déchets (9/7/1998). La Cour administrative d'appel annulait ce jugement (5/10/1998) et le Conseil d'Etat a confirmé l'annulation (23 mai 2001). L'ADEPAL adresse un recours devant la Commission européenne car COGEMA base ses calculs de dose à la limite du site sur la limite de dose efficace annuelle de 5 mSv en vigueur en France alors que la directive européenne du 13 mai 1996 la fixe à 1 mSv. La Commission des communautés européennes donne raison à COGEMA à la suite des calculs que COGEMA a fourni indiquant que la dose d'une personne du public ne dépasserait pas 0,4 mSv/an en limite de site.

[2] www.irsn.fr/vf/04_act/04_act_1/04_act_archives_ipsn/04_act_communiques_2001/04_act_010112.shtm *Risques associés à l'uranium appauvri dans les obus perforants.*

[3] Il y a eu une première ordonnance n°2001-270 du 28 mars 2001 puis le décret n°2002-460 du 4 avril 2002.

[4] J. O. des Communautés européennes N° L 159, 29 juin 1996. DIRECTIVE 96/29 EURATOM DU CONSEIL du 13 mai 1996, fixant les normes de base relatives à la protection sanitaire de la population et des travailleurs contre les dangers résultant des rayonnements ionisants.

[5] Claude Birraux, Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques Rapport sur le contrôle de la sûreté et de la sécurité des installations nucléaires, Tome 1 : Conclusions du rapporteur. (Elles ont été présentées lors de la séance du 6 mars 1996 de l'Office et adoptées à l'unanimité). Rapport n°2651 de l'Assemblée Nationale, page 165.

Les 2 tomes de ce document sont particulièrement importants.

[6] « *Calcul des activités massique et totale du produit à entreposer : non prise en compte des descendants à vie courte de l'uranium 238 et de l'uranium 235. Classement de l'installation* ».

Ce document COGEMA fait partie d'une série de courts textes communiqués à l'avocat de l'ADEPAL et que Mme Bernadette Prieur nous a permis de consulter. Nous l'en remercions vivement.

[7] Rapport de l'inspecteur des installations classées (GR/JB n°365) « *Entreposage d'uranium appauvri à Bessines-sur-Gartempe. Compte-rendu de fonctionnement au 31/12/2001. Données technico-économiques.* » Communication au Conseil Départemental d'Hygiène- 19 novembre 2002.

[8] « *De la sous-estimation des teneurs pour stocker le maximum de produit en dessous du seuil INB et des différences de calcul* ». Document communiqué à l'avocat de l'ADEPAL.

[9] Claude Birraux, *Ibid.* p. 100, tome I et aussi tome II, p. 184.

[10] Sur les contraintes de doses :

- En Lituanie la contrainte de dose d'une installation nucléaire est de 0,2 mSv/an.

<http://www.rsc.lt/eng/faq/>

- Aux USA, l'EPA (agence de protection de l'environnement) indique une dose de 0,25 mSv/an comme critère radiologique d'un territoire à usage sans restriction, (dose distincte du rayonnement naturel) et incluant la consommation d'eau des nappes phréatiques, la radioactivité résiduelle ayant été réduite à des niveaux aussi bas que possible d'une façon raisonnable (principe ALARA, as low as reasonably achievable). (Extrait du « US Government Printing Office, via GPO access) 10CFR20, Subpart E, Radiological Criteria for License Termination).

- UNEP/UNCHS Balkans Task Force (BTF) « The potential effects on human health and the environment arising from possible use of depleted uranium during the 1999 Kosovo conflict. A preliminary assessment. October 1999, page 57.

[11] J. Aigueperse *et al.* Rapport DPHD/2001-01, février 2001 *Etat des connaissances sur les risques potentiels associés à l'uranium appauvri utilisé dans les armes.* Rapport rédigé au sein de la Cellule Médico-sanitaire (CMS). Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Département de Protection de la Santé de l'Homme et de la Dosimétrie.

[12] The Royal Society, 2001 *The Health Hazards of Depleted Uranium, Part 1.*

Michael Bailey and Clive Marsh, Appendix 1. *Exposures arising from the use of depleted uranium on the battle field.*

[13] Roger Belbéoch. Les risques de cancer chez les mineurs d'uranium français. *Gazette Nucléaire* 129/130, décembre 1993. *Gazette Nucléaire* 111/112 novembre 1991.

Les risques de cancer chez les mineurs d'uranium *Travail* n°26, automne 92, 133-137.

Colloque « Uranium et Santé ». Limoges, 8 novembre 1993.

[14] F. Papezyk et R. Belbéoch *Etude du facteur de risque cancérigène sur un groupe de travailleurs du Centre d'études nucléaires de Saclay ayant travaillé sur uranium* ». Complément au rapport de mars 1986. Exposé devant le CHS de Saclay le 19 mars 1992.

[15] Chris Busby Science on trial : On the Biological Effects and Health Risks following Exposure to Aerosols produced by the use of Depleted Uranium. (Invited presentation to the Royal Society, London, July 19th 2000). <http://www.llrc.org/du/subtopic/durs.htm>

[16] Pierre Flor-Henry, Conférence du 19 juin 2001, Collège de France.

Effets de la radioactivité :hémisphère dominant gauche. Augmentation de la schizophrénie et du syndrome de fatigue chronique (SFC) dans la zone d'exclusion de Tchernobyl et syndrome de la guerre du Golfe.

[17] M. A. Kadhim *et al* Transmission of chromosomal instability after plutonium α -particle irradiation, *Nature*, vol 355, 20 February 1992.

[18] Bruce Lehnert et le « bystander effect »

www.eurekalert.org/features/doe/2001-07/danl-rbe060702