

**Colloque: «le nucléaire du futur», organisé par la Fondation Ecologie d'Avenir,
Collège des Bernardins, 75005 Paris
Le jeudi 22 novembre 2012**

Daniel Heuer: Thorium et sels fondus

Bonjour, d'abord je vous remercie de m'avoir invité à faire cette présentation.

Bon je vais essayer d'être un peu rapide, mais j'ai quand même préparé un certain nombre de choses.

Donc je vais vous parler maintenant de réacteurs à sels fondus et de thorium. On va revenir sur les intérêts du thorium et pourquoi utiliser le thorium et pourquoi le mettre en sel fondu et c'est essentiellement ça que j'aimerais faire passer comme message.

Alors quels sont les avantages du cycle thorium? Donc Carlo Rubbia nous les ont déjà cités. Je vais vous citer trois avantages que l'on met en avant généralement et ensuite je vais le mettre un peu en perspective parce qu'il faut les comparer au cycle uranium et non pas les comparer aux réacteurs actuels.

Les avantages, donc le premier c'est que déjà le cycle thorium est le seul alternative au cycle uranium. Il n'y a pas 36.000 alternatives. Donc puisqu'il n'y en a qu'une, en parlant uniquement de fission bien sûr, puisqu'il n'y a qu'une seule alternative, autant la regarder.

Alors les trois avantages à priori, le premier c'est une production de transuraniens réduite. Carlo Rubbia vous l'a montré. En effet on démarre avec 6 masses en moins donc on a beaucoup plus de mal à aller produire les noyaux plus lourds – Américium, Curium.

Le deuxième avantage c'est la régénération au spectre thermique, Carlo Rubbia vous l'a montré aussi. Ce cycle peut être régénérateur en spectre thermique, ce qui peut apporter éventuellement un certain nombre d'avantages. Et (donc je vais un peu vite, pour essayer de gagner du temps), le troisième avantage, c'est la non prolifération. Donc on présente souvent le cycle thorium comme étant non proliférant, parce que lorsqu'un on produit de l'uranium 233 on n'a pas le choix de ne pas produire de l'uranium 232. Or cet uranium 232 quand il décroît, à un moment donné à la fin de chaîne de décroissance il émet un gamma extrêmement énergétique. Donc on a un rayonnement très énergétique dont on du mal à se protéger.

Donc il est difficile de transporter en cachette de l'uranium 233 qui contient ne s'en reste que quelques centaines de ppm d'uranium 232. Ça se verra très facilement, il faut au moins 50cm de plomb pour se protéger, donc on ne va pas pouvoir transporter des quantités importantes. Donc c'est de ce point de vue là qu'on considère que le thorium est non proliférant.

Alors, quand même, que nous apporte ces avantages par rapport au cycle Pu, et non pas par rapport aux réacteurs actuels parce que par rapport aux réacteurs actuels les avantages qu'on obtient sont ceux qui ont déjà été cités, qui sont : meilleure utilisation des ressources et moins de production de déchets. Mais on a deux cycles pour le faire : voyons qu'est ce que ça nous apporte. Alors, la partie faible production de transuraniens : d'une part il y a un transuranien supplémentaire qui est produit qui est (ce n'est pas un transuranien parce qu'il est en dessous) un actinide, c'est le protactinium 231. Donc il faut quand même se méfier de ce protactinium qui n'est pas si gênant que ça mais qui est quand même produit : il ne faut pas l'oublier.

Ceci dit, si on utilise un cycle régénérateur, ça veut dire qu'obligatoirement on va devoir recycler le

combustible puisque vous aller vouloir remettre en permanence tous les actinides que vous avez dans votre réacteur et les sortir, recycler, enlever les produits de fission et remettre ces actinides à l'intérieur. Si vous faites ça alors vous ne rejetez pas d'actinides, et donc le fait d'en produire moins ne va pas avoir un avantage considérable : produire moins ou 3 fois moins ça ne va pas faire une grande différence.

Donc ce n'est pas si significative que ça, à condition de vraiment faire un retraitement complet des actinides. Ceci dit, il faut quand même faire attention à l'inventaire final, et j'en parlerai toute à l'heure.

Alors, la régénération en spectre thermique, oui, effectivement il a été démontré qu'on pouvait être régénérateur en spectre thermique, il y a eu une expérience en combustible solide à Shippingport qui le montre, mais on est embêté par la présence des produits de fission, par la présence du protactinium 233, qui nous oblige à avoir un retraitement très important, relativement rapide: le réacteur qui avait été prévu par les américains qui s'appelait le MSBR en réacteur à sels fondus demandait de retraiter 4 mètres cubes de combustible par jour, ce qui n'est quand même pas quelque chose de facile à faire, ça ne veut pas dire que ce n'est pas faisable, mais c'est quand même très difficile. C'est parce que c'était un réacteur thermique.

Or ceci dit, du coup on a un inventaire beaucoup plus faible aussi – en spectre thermique l'inventaire fissile est beaucoup plus faible, c'était quand même un avantage.

Et la résistance à la prolifération – oui, effectivement c'est un avantage mais c'est aussi un inconvénient, c'est à dire que comme on a besoin d'un retraitement on va devoir se protéger de ce gamma pendant le retraitement, ce qui n'est pas forcément quelque chose de très simple. Et là donc on trouve une solution relativement simple à cette question là qui est le combustible liquide. C'est toujours plus facile de manipuler des liquides que de manipuler des solides. Ce n'est pas pour rien que nos voitures fonctionnent avec de l'essence liquide et non pas avec du charbon. C'est plus facile de faire circuler un liquide.

Donc du coup, cycle thorium et combustible liquide, alors quels sont les avantages d'un combustible liquide ? D'abord vous avez l'homogénéité du combustible. Vous n'avez pas de problème de plan de chargement. Votre combustible est toujours homogène, vous n'avez pas des zones qui ont été plus irradiées que d'autres, avec des composants qui sont différents, où vous avez plus de fissile quelque part ou ailleurs, non, tout est homogène tout le temps puisque le combustible circule en permanence, les temps caractéristiques c'est quelques secondes.

Ensuite, la chaleur est directement produite dans le caloporteur. Alors, c'est un peu un faux caloporteur, c'est quand même le combustible, mais vous déposez les fragments de fission dans le caloporteur qui s'en va immédiatement du centre du coeur pour aller vers les échangeurs de chaleur. Et là, vous gagnez une réactivité du réacteur qui est très très importante : on montre que grâce à cet avantage là, on peut piloter le réacteur uniquement de l'extérieur par la demande de puissance et qu'on n'a pas besoin de barres de commande et de barres d'arrêt d'urgence ou de choses de ce genre là, au contraire on introduit un risque en les mettant.

Donc dans le réacteur que je vous montrais toute à l'heure, il n'y a pas ce genre de chose, le pilotage est fait uniquement à l'extérieur grâce à cet avantage du fait que la chaleur est directement déposée dans le caloporteur.

Ensuite, on a la possibilité de re-configurer le coeur en quelques minutes. C'est un liquide, donc un liquide vous pouvez lui donner la forme que vous voulez. Donc lorsqu'il est dans le coeur lui même, ce liquide, la géométrie est faite pour assurer la production de puissance et donc assurer qu'on

contrôle correctement la criticité, mais lorsque vous voulez arrêter le réacteur, vous faites écouler le combustible liquide dans d'autres réservoirs qui eux ont une géométrie telle qu'on est sûr de ne jamais être critique et la puissance résiduelle est évacuée passivement, sans aucune intervention.

On a deux géométries différentes – on n'est pas coincé comme à Fukushima où d'un seul coup vous n'avez plus de refroidissement mais le combustible il est là, il ne peut pas bouger. Vous pouvez, il va automatiquement ailleurs et c'est vraiment un très très gros avantage de sûreté.

Ensuite vous avez la possibilité de retraiter le combustible sans arrêter le réacteur, alors les CANDU qui sont en combustible solide peuvent faire ça parce que tous les jours on retire une partie du combustible solide, mais là c'est à la limite encore un peu plus simple puisque c'est un liquide, on peut faire une ponction, on peut réinjecter à l'intérieur, et donc on peut faire un retraitement relativement simplement, bon c'est pas si simple que ça, mais on n'est pas obligé d'arrêter le réacteur.

Alors quelles sont les contraintes sur le type de liquide? Donc il faut tenir compte d'un certain nombre de choses, la température de fusion, la température d'ébullition, les tensions de vapeur etcetera, je ne vais tout passer en revue, tout est écrit là, mais il y a des contraintes à respecter pour assurer le fonctionnement du réacteur. Et quand on met toutes ces contraintes en ligne et qu'on essaie de trouver une solution, et ben en effet on n'en trouve pas beaucoup, en fait on en trouve qu'une, ce sont les fluorures de lithium. Il n'y pas d'autres options de liquides qui permettent de faire un réacteur de puissance qui vont assurer la sûreté et un fonctionnement correct, pas de production de déchets etcetera, ce qui nous amène donc au réacteur à sels fondus : sels fondus ce sont en fait des fluorures, sels ça veut dire que ce sont des liquides ioniques.

Et il se trouve que le fluor a une propriété assez particulière, vous voyez là trois spectres, vous avez en rouge un RNR sodium, en vert c'est un sel fondu avec des fluorures, et en bleu un réacteur actuel en spectre thermique. Et vous voyez qu'entre le rouge et le vert coté droit vous avez un gros écart, vous avez un creux dans la courbe verte, qui veut dire qu'en fait il n'y a pas de neutrons rapides, les neutrons très rapides (puisque en abscisse c'est l'énergie des neutrons), les neutrons très rapides sont absorbés en fait par le fluor. Il ne les absorbe pas, il les projète un peu plus sur la gauche sur le dessin, vous voyez que la courbe vert passe au dessus de la courbe rouge à cet endroit là.

Donc en fait, on n'a pas beaucoup de neutrons rapides et donc le cycle U/Pu, lui a du mal à fonctionner, à être régénérateur avec un tel spectre parce que lui il a vraiment besoin de neutrons rapides pour être régénérateur. Donc ça nous amène automatiquement au cycle thorium. Donc si vous voulez un combustible liquide vous avez forcément le cycle thorium.

Alors, rapide historique sur les réacteurs à sels fondus – je vais passer très vite. D'abord il y a eu un premier réacteur qui s'appelait l'ARE qui avait pour objectif de faire voler des avions, comme on fait fonctionner des sous-marins pendant plusieurs mois sous l'océan, on peut faire voler un avion pendant plusieurs mois, on voit l'intérêt pour les militaires. Le réacteur a fonctionné à 2,5MW thermiques pendant une centaine d'heures, il y a eu de gros problèmes de corrosion, les fluorures ne sont quand même pas tout à fait anodins au niveau de la corrosion.

Deuxième réacteur, le MSRE : lui il a fonctionné à 8MW thermiques pendant 5 ans. Il n'était pas à pleine puissance pendant 5 ans mais le sel était chargé quasiment pendant 5 ans. Il n'y a pas eu de problèmes de corrosion, donc ce problème a été parfaitement résolu par les américains à cette époque là, grâce (Carlo Rubbia en a parlé) à la Hastelloy-N qui permet de manipuler ce genre de combustible sans problème. Notez qu'il n'y a jamais eu de thorium dans ce réacteur.

Ensuite il y a eu une étude, le MSBR qui est un réacteur de 2500MW thermiques, Carlo Rubbia en a

parlé toute à l'heure. Ce réacteur était un projet qui a été arrêté en '76 aux Etats-Unis pour différentes raisons, bon l'arrêt d'un projet c'est toujours des raisons multiples.

Ce projet a été repris par un certain nombre de pays : le Japon, la France a beaucoup travaillé chez EDF sur le concept jusqu'aux années 2000, le début des années 2000, le CNRS c'est ce que je vais vous montrer toute à l'heure, tout de suite, la Russie travaille avec nous actuellement mais depuis les années '90, les USA aussi dans les années '90 ont pas mal travaillé sur le sujet, la Tchèque, et puis la Chine qui a fait un énorme investissement en 2011 : 250 millions de dollars, leur but étant de construire un réacteur type MSRE, donc l'image que vous avez en bas à droite, un réacteur de ce type là, d'ici 2017.

Et puis le forum internationale génération 4 dont on vous a déjà parlé a retenu le MSBR parmi les 6 concepts qui ont été retenus. Le CNRS dans tout ça : on a commencé par travailler avec les américains, avec Charlie Bowman sur un projet de réacteur à sels fondus sous-critique, et puis on a fait la ré-évaluation du MSBR, donc qui a été proposé : ça a été pour nous l'occasion de développer de nouveaux codes, de nouvelles façons de travailler donc avec ce qu'on appelle les Monté-Carlo évolutifs, de manière à pouvoir plus facilement, utiliser mieux les nouvelles puissances de calcul et plus facilement pouvoir étudier des géométries particulières.

Et on a constaté un certain nombre de choses qui n'étaient pas très sympathiques : d'abord il y avait un coefficient de contre réaction qui était nul voire positif dans certaines conditions, essentiellement à cause du graphite qui était dans le réacteur et ça c'est pas acceptable, on ne peut pas avoir un réacteur de ce type là. Bon, le coefficient de vide, lui était très largement positif, on reproche ça au RNRNA et là c'était le cas. Il y avait un retraitement je vous l'ai dit de 4 mètres cubes par jour et puis il y avait du graphite dans le coeur, le graphite, il y a une durée de vie limitée dans le coeur, tous les 2 à 5 ans il faut le changer, on ne sait pas retraiter le graphite, on ne sait pas le stocker, et puis il y a aussi les risques d'incendie du graphite.

Donc on a conclu, comme nous a dit toute à l'heure Christophe Béhar, que le MSBR n'avait pas la capacité à devenir un réacteur industriel et d'ailleurs tous les experts de l'époque disaient que ce n'est pas un réacteur tout à fait pertinent, et donc il y avait des problèmes, on le voit très clairement. Ceci dit, les avantages intrinsèques d'un combustible liquide, eux ils restent.

Donc notre démarche a été de dire, puisqu'il y a ces avantages là, voyons ce qu'on peut faire d'autre. Alors je passe toutes les étapes parce que je n'ai pas un temps infini, et donc j'en vienne directement au résultat : on s'est fixé un certain nombre de critères, alors je les liste là très rapidement, c'est en gros les critères Gén. 4, en réalité nos critères sont beaucoup plus restrictifs que les critères Gén. 4, en particulier il y a l'acceptabilité social dedans qui n'apparaît pas dans Gén. 4. Et avec ces critères on a pu définir un nouveau type de réacteur, donc voilà une image tout à fait simplifiée, qui a été baptisée "Molten Salt Fast Reactor" donc le MSFR, qui a donc comme différence fondamentale par rapport au MSBR c'est qu'il n'y a plus de graphite. On a supprimé le graphite puisque c'est lui qui posait essentiellement tous les problèmes, et donc c'est une grande cuve dans laquelle circule un liquide qui est un fluorure.

Alors, ce réacteur il a un certain nombre d'avantages, d'abord tous les coefficients de contre réaction sont très largement négatifs, y compris le coefficient de vide, il n'y a pas réellement de coefficient de vide mais un coefficient de densité : si on chauffe le coefficient de densité est très négatif, donc si il y a une bulle à l'intérieur il y a une forte baisse de la réactivité. Et donc on a là un réacteur intrinsèquement stable, parfaitement sûr, qui n'a besoin comme je vous l'ai dit ni de barres de commande ni de barres d'arrêt d'urgence : on arrête le réacteur en vidant le sel tout simplement.

L'absence de matériaux dans la zone à haut flux, donc le centre du coeur, fait qu'on produit

beaucoup moins de déchets de type éléments de structure irradiés et ça évite aussi un certain nombre d'interventions en coeur puisqu'il n'y a pas de gaines de combustible par exemple, il n'y a pas d'assemblages à l'intérieur etcetera, donc tout cela simplifie les choses.

Le spectre neutronique est rapide : il permet une bonne régénération de la matière fissile et puis comme il est rapide aussi il améliore l'incinération des transuraniens, donc ça pas mal de personnes en ont déjà parlé. Le fait d'avoir un spectre rapide fait qu'on peut fissionner à peu près tous les actinides. Le MSFR en fait, on pense que c'est un "mange tout" dans le sens qu'on peut vraiment mettre n'importe quelle composition d'actinides à l'intérieur – à partir du moment qu'on arrive à avoir la criticité le réacteur fonctionne dans de très bonnes conditions, garde ses caractéristiques particuliers – ses coefficients de contre réaction toujours très largement négatifs, donc en particulier on peut mettre dedans du plutonium, des actinides mineurs, même en quantité relativement importante.

Alors si on compare les spectres, c'est ce que je vous ai montré toute à l'heure en plus petit, donc vous avez ici le RNR sodium, donc on a un spectre comme je vous l'ai dit où on a un peu moins de neutrons rapides, c'est vraiment un spectre rapide, il ne ressemble pas du tout au spectre d'un réacteur à eau pressurisé, mais on a un peu moins de neutrons rapides et alors moins de neutrons rapides ça veut aussi dire moins de dégâts aux matériaux. Alors il n'y pas de matériaux dans le coeur mais évidemment il y a un contenant, donc ce contenant va être irradié et il est fortement moins irradié, c'est effectivement un facteur 10. Donc ça donne une durée de vie pour ces matériaux qui est 10 fois plus importante du coup.

Ce réacteur a été retenu par le forum international Gén. 4 en 2008 à la place du MSBR, c'est à dire que maintenant chaque fois qu'on vous présente le forum, les 6 concepts de Gén. 4, on voit toujours apparaître le MSBR mais en réalité c'est pas vrai – dans tous les documents c'est pas le MSBR c'est le MSFR qui se trouve là et qui est donc étudié.

Alors je vous donne une image – je précise bien qu'il ne s'agit pas d'une image d'un réacteur qui pourrait exister, on est très très loin de vouloir construire quelque chose, mais vous avez à peu près tous les éléments. Alors je vais aller très très vite, juste vous dire deux petites choses. D'abord vous avez, bon le coeur vous voyez la partie centrale, vous voyez que l'ensemble est entouré par une cuve réacteur, donc tous les échangeurs de chaleur, toute la circulation du sel se fait à l'intérieur de la cuve réacteur, évidemment.

Vous voyez la partie jaune qui a son importance – on injecte du gaz en permanence dans le coeur du réacteur pour nettoyer à peu près la moitié des produits de fission qui sont enlevés et qui vont se retrouver dans le tore en haut, jaune, qui est aussi à l'intérieur de la cuve réacteur. Et le tore gris c'est en fait un niveau libre, vous avez un liquide donc forcément vous avez quelque part un niveau libre dont le niveau peut varier avec la température.

Alors je passe rapidement les détails techniques : on travail sur un réacteur de 3GW thermiques, on a besoin de 3,6 tonnes d'uranium 233 par GW électrique pour faire fonctionner le réacteur, bon il fait 18 mètres cubes de sel dont la moitié est dans la partie coeur, l'autre moitié dans la circulation extérieure. Le reste je passe rapidement, vous avez le coefficient de contre-réaction donc fortement négatif, dont le coefficient de densité – vous avez -3,7 pcm/degré, qui peut être vu comme un coefficient de vide.

Et puis donc le réacteur est régénérateur avec un temps de doublement de l'ordre de 50 ans à 100 ans, ça c'est parce qu'on peut régler le retraitement, la vitesse du retraitement de manière à régler la régénération – parfois dans les scénarios il est nécessaire de ne pas régénérer : on n'a pas forcément besoin d'augmenter la puissance installée.

Alors deux petits points techniques que je vais passer que je trouve importants, je ne sais pas combien de temps il me reste...?

- 2 minutes
- Il n'en reste plus du tout mais vous pouvez y aller quand même!

Alors ce point là je le saute, il s'agit seulement de dire comment on fait pour démarrer, on n'a pas d'uranium 233 mais on a des solutions avec des mélanges du genre uranium enrichi, plutonium, actinides mineurs, on a des solutions qui fonctionnent très bien, par contre ce point là je veux vraiment le discuter, c'est ce qu'on appelle la fin de jeu.

On parle du futur du nucléaire, évidemment le nucléaire a un futur, mais un moment donné on peut imaginer qu'on fasse autre chose, que notre société fasse autre chose, qu'on ait un autre moyen de produire de l'énergie, l'énergie du vide – je ne sais pas quoi, et donc un jour on va s'arrêter. Et quand on va s'arrêter on va se retrouver avec l'inventaire des réacteurs qui fonctionnent.

Et si vous considérez que lorsque vous faites le retraitement tous les 5 ans à peu près vous reprenez l'ensemble du volume du cœur, c'est vrai pour un RNRA aussi, et que vous rejetez 0,1% des actinides qui sont dans ce cœur lors du retraitement (vous allez forcément dégrader), alors il va falloir 5000 ans de fonctionnement pour avoir autant de rejets que ce que vous avez dans le cœur du réacteur.

Donc quand vous arrêtez le réacteur, vous arrêtez la filière, alors vous vous retrouvez avec un stock de déchets qui est largement supérieur à tout ce que vous pouvez produire pendant 5000 ans de fonctionnement. Donc c'est quelque chose qu'il faut regarder, qu'on a regardé – on a donc envisagé un réacteur incinérateur : puisque c'est un mange-tout, il peut aussi manger ces inventaires là, et en 60 ans on peut réduire d'un facteur 10 ces inventaires, avec les courbes de radiotoxicité que vous voyez là, vous voyez qu'on a un gain d'un facteur 10, la courbe bleue, justement dans la période où les sites de stockage commencent ... quand on a dépassé quelques dizaines de milliers d'années on peut commencer à avoir des doutes.

Je finis sur le thorium à l'international. On a déjà parlé de l'Inde qui devrait faire diverger rapidement, actuellement un réacteur en U/Pu de 500MW électriques. Leur but c'est de mettre des couvertures thorium de manière à produire de l'uranium 233 mais cet uranium 233 devrait être utilisé dans des réacteurs type CANDU, avec un cycle thorium / uranium en combustible solide, légèrement sous-générateur et alimenté par de l'uranium produit dans des réacteurs rapides plus classiques je dirais.

En combustible liquide, le Japon n'a jamais arrêté de travailler sur les projets du genre Fuji, et souhaiterait construire un réacteur dans les années qui viennent. La Russie travaille avec nous avec le projet MOSART en particulier, qui est un incinérateur en réalité, mais qui pourrait devenir un producteur d'énergie en cycle thorium, et donc on a un projet commun avec eux sur la partie production d'électricité en cycle thorium donc le MSFR en réalité. Donc c'est ce projet là, EVOL, donc qui a une partie Europe et une partie russe avec le projet MARS.

Et la Chine donc qui a investi 250 millions de dollars en février 2011 avec pour but de construire dans un premier temps d'ici 2017 un réacteur à sels fondus type MSRE puis (et ça il nous l'ont dit clairement) dans un deuxième temps ils veulent s'intéresser au MSFR et passer à l'étude de construction d'un démonstrateur du MSFR.

Beaucoup d'autres pays ont montré leur intérêt, et donc en conclusion je rappelle les points qui me semblent importants :

Le cycle thorium est la seule alternative au cycle uranium, donc il serait idiot de ne pas s'y intéresser

Le thorium est bien adapté au combustible liquide de type fluorure, et les fluorures trouvent tout leur potentiel dans le thorium.

Voilà, je vous remercie.

- Bien, alors les 3 prochains exposés seront sur des thèmes qui n'ont pas encore été discutés, donc je vous dirais, sauf s'il y a une question très importante sur ces questions un peu déjà largement débattues ... y a-t-il une question indispensable? Monsieur...

- C'est une question rapide et simple : quel est le budget français pour cette recherche ?

- Le budget !

Alors, le budget, pour l'instant on travaille avec le projet Européen EVOL qui est un projet d'un million d'Euros pour dix labos européens, enfin pour 10 pays, sur 3 ans seulement. Donc c'est 300.000 Euros par an répartis entre 10 pays ça fait donc pas grande chose.

Au niveau vraiment français, jusqu'à présent on avait le programme PACEN qui donnait environ 250.000 Euros par an en moyenne, qui est maintenant arrêté – c'est le projet NEEDS (?) qui a pris le relais et qui lui nous donne que 70.000 Euros pour pouvoir faire ces études. Donc en fait on est 5 ou 6 personnes à travailler à Grenoble sur le sujet et un certain nombre de personnes qui veulent bien travailler avec nous mais plus ou moins gratuitement.

- Bon, je vous remercie.