

LE RUBBIATRON : TINGUELY AU SECOURS DU NUCLÉAIRE

Pierre Lehmann

Les médias ont abondamment fait état d'une proposition, qualifiée de révolutionnaire, faite par M. Carlo Rubbia, ancien directeur du CERN, et grâce à laquelle l'énergie nucléaire deviendrait propre, sûre et éternelle. La proposition consiste, en bref, à utiliser un réacteur sous-critique alimenté en neutrons rapides par un accélérateur et consommant du thorium (au lieu d'uranium) comme combustible.

Ce réacteur ne sera ni propre, ni absolument sûr. Mais il sera compliqué et coûteux, et sa faisabilité n'est pas aussi évidente que M. Rubbia et la plupart des médias le laissent entendre.

Comme dans une centrale nucléaire classique, l'énergie fournie par le réacteur sera obtenue par la fission de noyaux lourds. Les quantités de déchets radioactifs produits par la machine de M. Rubbia (appelons-la le Rubbiatron) ne seront donc pas très différentes de celles que produisent les centrales nucléaires existantes. La différence principale sera que ces déchets contiendront beaucoup moins d'actinides. Les actinides (Neptunium, Plutonium, Curium, etc.) sont problématiques parce qu'ils ont une durée de vie très longue, ce qui rend leur stockage définitif dans le sous-sol irresponsable. Mais dans le moyen terme (quelques centaines d'années), ce ne sont pas les actinides, mais les produits de fission qui sont responsables de l'énorme radioactivité contenue dans les déchets des centrales nucléaires et le Rubbiatron en générera tout autant. Par ailleurs, des actinides ont déjà été produits par milliers de tonnes (centrales nucléaires classiques et programmes d'armement) et leur élimination donne des maux de tête très aigus aux nucléocrates. Ce problème restera entier avec ou sans Rubbiatron.

La sécurité du Rubbiatron est décrite comme absolue parce que l'arrêt de l'accélérateur conduit à l'arrêt des réactions de fission dans le réacteur. Mais si le réacteur a fonctionné pendant un temps suffisant, une perte de réfrigérant aura les mêmes conséquences que dans une centrale classique : la fusion du cœur. Cette perte de réfrigérant, qui se trouve être en l'occurrence du plomb fondu, ne peut pas davantage être exclue dans le Rubbiatron que dans Superphenix ou dans une centrale classique.

L'idée d'utiliser le thorium au lieu d'uranium est déjà ancienne et sa mise en oeuvre n'est manifestement pas évidente. Le thorium doit d'abord être transformé en uranium (isotope 233) par bombardement neutronique avant de pouvoir être fissionné pour produire de l'énergie. Le cycle du thorium est bien joli sur le papier, mais il n'a pas été maîtrisé dans la pratique. De plus, l'uranium 233 est idéal pour la fabrication de bombes atomiques artisanales.

On se trouve donc devant un nouveau grand projet industriel du style de ceux de la surgénération et de la fusion, deux propositions qui se sont avérées être des vues de l'esprit, mais qui continuent à engloutir des sommes fabuleuses fournies par le contribuable et sans qu'on lui ait demandé son avis. Le Rubbiatron sera affublé en plus d'un ou plusieurs accélérateurs de protons, machine qui n'est ni simple, ni bon marché. On ne peut s'empêcher de penser à Tinguely, dont les machines ne faisaient rien d'utile, mais le faisaient au moins à bon marché.

La proposition de M. Rubbia, prestige de prix Nobel aidant, a réussi à séduire des politiciens eu peu trop crédules comme MM. G. Petitpierre et M. Leuenberger. Peut-être M. Rubbia a-t-il été inspiré par la remarque de Denis de Rougemont, selon laquelle le pouvoir aime ce qui est cher, centralisé et dangereux, parce que cela lui permet de mieux asseoir son autorité. Mais il n'en serait pas moins inadmissible que le projet de M. Rubbia soit progressivement mis en chantier sans qu'il ait été au préalable analysé en détail, et dans toutes ses ramifications, par un groupe d'experts neutres qui ne soient inféodés ni au CERN, ni aux promoteurs du nucléaire, Office fédéral de l'énergie compris.

Si les milliards qui ont été dépensés en pure perte dans la recherche de la fusion contrôlée et dans la mise en oeuvre de la surgénération (Superphenix) avaient été utilisés pour améliorer les rendements et développer les énergies renouvelables, la problématique de l'énergie serait bien plus simple aujourd'hui. La faillite définitive du nucléaire n'est plus qu'une question de temps et le Rubbiatron n'y changera rien. Si le CERN veut se rendre utile dans le domaine de l'énergie, il a mieux à faire que d'essayer de remettre en selle la fission de l'atome. Et s'il n'a pas d'idées, on peut lui faire des suggestions.

Vevey, 23.8.96.

Commentaire sur les allégations de M. Pierre Lehmann (version révisée)

Nous n'avons pas l'intention de polémiquer avec M. Lehmann. Il va de soi que nous lui laissons l'entière responsabilité de ses opinions et de ses déclarations à caractère politique.

Rappelons d'ailleurs que nos propositions sont celles de scientifiques, soucieux avant tout d'approfondir (à l'aide simulations informatiques ou de mesures) les connaissances qui permettent de définir des options possibles en matière énergétique. La décision de choisir ou non telle ou telle option, appartient évidemment au pouvoir politique et n'est pas de notre ressort.

Par contre nous ne pouvons passer sous silence un certain nombre d'inexactitudes factuelles qui nous paraissent singulièrement affaiblir sur le plan technique la portée de ses critiques à la proposition de l'Amplificateur d'Energie.

1) Le problème des Actinides.

M. Lehmann admet que l'Amplificateur d'Energie produit beaucoup moins de déchets actinides que l'énergie nucléaire classique mais rappelle que "des actinides ont déjà été produits par milliers de tonnes (centrales nucléaires classiques et programmes d'armement)". A son avis, le problème reste donc entier.

Ceci est faux, l'Amplificateur d'Energie, outre son mode de fonctionnement à partir de l'uranium 233 (produit au sein du thorium), est également capable de brûler le plutonium et les autres actinides. En mélangeant du plutonium avec du thorium, nous proposons de détruire intégralement les stocks de plutonium civils et militaires. C'est le seul procédé qui peut opérer cette destruction sans engendrer ce faisant la production d'autres déchets actinides parasites. Les autres propositions – par exemple l'emploi de réacteurs classiques ou de Superphénix en mode sous-générateur – peuvent réduire quelque peu mais ne peuvent éliminer complètement les stocks de plutonium existant.

Si M. Lehmann propose l'arrêt du nucléaire – c'est son droit ! – peut-être est-il permis de lui demander ce qu'il compte faire des déchets déjà existants? Comme il le dit lui même "le problème reste entier"...

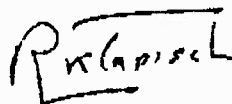
2) La fusion du coeur

Ce type d'accident peut théoriquement survenir dans un réacteur classique si le pompage du fluide de refroidissement est interrompu. La température du fluide de refroidissement s'élève alors jusqu'au point où le fluide est perdu (ébullition) amenant la fusion du coeur. Ce type d'accident est très peu probable et les conceptions classiques de sûreté nucléaire visent à diminuer le plus possible cette probabilité.

En ce qui concerne l' Amplificateur d'Energie, il ne s'agit plus seulement de rendre un accident improbable mais tout simplement impossible. C'est ce qu'on appelle parfois la sûreté déterministe. En effet, dans l'Amplificateur d'Energie, la chaleur est normalement évacuée par convection à l'intérieur du bain de plomb fondu. Il n'y a pas de pompes, il ne peut donc y avoir de panne ! Dans le cas bien improbable où l'évacuation de chaleur du circuit secondaire serait empêchée, l'augmentation de température du plomb déclencherait immédiatement l'arrêt de l'accélérateur et de la production d'énergie. Bien entendu, même après l'arrêt, il subsiste un dégagement de chaleur substantiel, dû à la radioactivité, qui va diminuer rapidement avec le temps. Cette chaleur résiduelle est évacuée spontanément par convection d'air dans une cheminée et par rayonnement des parois de la cuve vers le sol. Au total, l'élévation de température transitoire est modérée. Elle ne peut en aucun cas mettre en péril l'intégrité des gaines de combustible et ne peut non plus amener à la perte par ébullition du fluide de refroidissement. En effet, le plomb (à la différence de l'eau ou du sodium), bout à température très élevée (près de 2000°C). L'enchaînement de circonstances qui dans le cas des réacteurs pourrait conduire à une fusion du coeur ne peut en aucun cas se produire avec l'Amplificateur d'Energie.

3) Autres objections

Nous nous sommes déjà souvent exprimés concernant le caractère non-proliférant de l'Amplificateur d'Energie. L'Uranium 233 qui s'y produit, dénaturé par la présence d'autres isotopes, est pratiquement impossible - a plus forte raison par des "artisans - à transformer en un engin militaire. De plus l'absence de pompes à l'intérieur de la cuve ouvre la voie à un fonctionnement "scellé" où le remplacement du combustible serait effectué (tous les 5 ans par exemple) sous le contrôle d'instances internationales. Quand aux accélérateurs de protons " machine ni simples ni bon marché", nous nous permettrons de prétendre que nous savons parfaitement de quoi nous parlons. Non seulement de telles machines fonctionnent couramment au CERN, mais elles sont également l'instrument de routine de nombreux hôpitaux de par le monde...



Robert Klapisch

4 Septembre 1996

Pierre LEHMANN
Sonzier
1822 CHERNEX

Copie

Sonzier, le 15 octobre 1996

Rédaction du journal
LE COURRIER
Case postale 238
1211 GENEVE 8

Courrier du lecteur

Avantages et inconvénients du Rubbiatron, réponse à M. Klapisch

Dans Le Courrier du 24.9.96, M. Klapisch du CERN répond longuement à mon article paru le 17 septembre dans vos colonnes, article dans lequel je m'étais permis de dire que l'"amplificateur d'énergie" (Rubbiatron) proposé par le CERN ne me paraissait pas être un projet raisonnable. Ayant été en vacances entre-temps, je ne réagis que tardivement aux affirmations de M. Klapisch.

M. Klapisch m'accuse d'abord de faire des déclarations "de caractère politique". C'est un peu vite dit. Contrairement au CERN, je n'ai pas de relations étroites avec les décideurs politiques des pays européens. Ces relations permettent au CERN de faire passer ses projets sans que leur bien-fondé ne soit discuté publiquement. Et, comme l'a relevé Suren Erkman dans "Le Monde Diplomatique" d'octobre 96, les journalistes scientifiques se contentent de se pâmer d'admiration devant les projets et réalisations du CERN sans les soumettre à une analyse critique. Il en résulte que le bon peuple est quasiment contraint de se prosterner devant la Science développée par le CERN, laquelle ne saurait produire que des choses merveilleuses et utiles, voire indispensables au "Progrès" (qui est-ce qui décide en quoi le progrès consiste ?). Cela me paraît contestable et c'est dans ce contexte qu'il faut placer ma critique du Rubbiatron.

J'en viens aux points techniques. M. Klapisch affirme de manière péremptoire que le Rubbiatron va permettre d'éliminer le plutonium et autres actinides dont l'énergie nucléaire nous a encombrés. Pour obtenir ce résultat, il faut tout de même un certain nombre de conditions. Il faut en particulier que les actinides soient incorporés dans une matrice de thorium. Cela exige que le retraitement du combustible irradié se poursuive. Or aujourd'hui, ce sont les usines de retraitement qui sont les plus grands pollueurs en terme de radioactivité (à l'exception de catastrophes de type Tchernobyl). Le retraitement traîne avec lui toute une chaîne de difficultés et de dangers, ne serait-ce déjà que ceux liés aux transports incessants de substances hautement radioactives qu'il provoque. Et une explosion dans une usine de retraitement peut avoir des conséquences bien pires que la catastrophe de Tchernobyl.

En admettant que le Rubbiatron fonctionne sans la moindre panne, combien de temps faudra-t-il à une telle machine pour débarrasser le monde de plus de 1000 tonnes d'actinides actuellement entreposés tant bien que mal ici et là ? D'après ses concepteurs, le Rubbiatron en éliminera 0,42 tonne par an, ce qui signifie qu'avec

./.

une machine de ce type, il faudrait au moins 2400 ans pour éliminer les actinides existants. Par ailleurs, des actinides continueront à être produits par les quelque 430 centrales nucléaires en fonction aujourd'hui. On peut bien sûr imaginer de construire plusieurs Rubbiatrons, ce qui raccourcirait le temps nécessaire à éliminer les actinides. Il est cependant douteux que cela puisse être fait rapidement. Si l'on en juge par d'autres grands projets industriels, il semble bien peu probable que le premier Rubbiatron puisse être mis en route avant une dizaine d'années. Il y aura ensuite une phase d'essais et de mise au point. Pendant ce temps, les centrales nucléaires existantes auront produit les 1000 tonnes d'actinides suivants. C'est ce que M. Rubbia et ses collègues appellent "un schéma réaliste d'élimination du plutonium". Il est d'autant moins raisonnable de faire des projets sur des dizaines, voire des centaines d'années, que nous sommes dans une période agitée avec des changements rapides. On ne peut même pas être sûr que dans dix ans il y aura encore des gouvernements. Or la stabilité politique est indispensable pour des projets potentiellement très dangereux et nécessitant une surveillance sans faille.

M. Klapisch n'a pas évoqué la perte de réfrigérant, hypothèse que l'on ne peut pas exclure complètement. Il s'est contenté de dire qu'il n'y avait pas de pompe de circulation pour le réfrigérant et qu'il ne pouvait donc pas y avoir de panne, la chaleur étant évacuée par convection. Dans les documents du CERN, la possibilité d'une perte du réfrigérant est cependant admise et discutée, mais seulement en termes de réactivité du coeur, donc de risque d'explosion nucléaire, risque qui serait nul selon les calculs des promoteurs de la machine. Mais si le réacteur a fonctionné pendant quelques années, la radioactivité résiduelle dans les éléments combustibles est capable de faire fondre ces éléments si le refroidissement n'est plus assuré. Avec quelles conséquences ? On ne le dit pas. La fusion du coeur peut pourtant conduire à un accident majeur. Cette possibilité (devenue incontestable après l'accident de TMI-2) a contraint maints exploitants de centrales nucléaires à s'équiper à grands frais de systèmes de refroidissement d'urgence.

Quand M. Klapisch dit que l'uranium 233 produit dans le Rubbiatron ne peut pas servir pour faire des bombes atomiques artisanales, il argumente du fait que d'autres isotopes présents dans les éléments combustibles irradiés rendraient cette fabrication difficile, voire impossible. Mais qu'en est-il après le retraitement ? Ce retraitement va séparer par voie chimique l'élément uranium, et ce dernier sera constitué essentiellement de l'isotope 233 (plus un peu de 234 et 235) et sera donc parfaitement convenable pour la fabrication d'armes nucléaires. Le problème n'est pas très différent de celui du plutonium 239 fissile obtenu à partir de l'uranium 238 non fissile (donc inutilisable pour une arme atomique) et extrait des éléments combustibles par les usines de retraitement. Or on sait que ce plutonium a déjà commencé à diffuser dans le marché mondial. Qui est-ce qui peut garantir une surveillance éternelle et sans faille des stocks de matières fissiles que la pratique du nucléaire sous toutes ses formes, y compris l'hypothétique Rubbiatron, nous forcera de gérer ?

Finalement M. Klapisch nous dit qu'il sait très bien faire des accélérateurs de protons. Je n'en doute pas. J'avais seulement indiqué que cette machine était un élément de complication supplémentaire dont les centrales nucléaires conventionnelles peuvent se passer. La gestion d'un parc de Rubbiatrons relèvera donc d'une expertise scientifique encore plus poussée que celle des centrales usuelles. Tout ça pour satisfaire des besoins en énergie dont on s'est contenté d'affirmer l'existence. Au moins le 30 % de l'électricité consommée aujourd'hui sert à alimenter des pertes et il me paraît préférable de réduire cette part avant de se lancer dans des grands projets industriels dont la nécessité n'est pas du tout évidente et les dangers considérables. Cette proposition me paraît avoir une certaine logique et n'a pas un caractère politique. Les scientifiques qui défendent des projets coûteux devraient accepter de considérer l'ensemble du problème dans lequel leur projet s'inscrit et ne pas évacuer les questions qui les dérangent. Sans cela les autorités continueront à inventer des besoins justifiant les grands projets industriels que la Science leur propose, projets qu'elles jugeront intéressants pour toutes sorte de raisons non forcément liées à la

./.

seule demande d'énergie. L'histoire nous a suffisamment montré qu'une fois les premiers grands investissements faits, ces projets sont presque impossibles à arrêter même s'ils n'ont plus de raison d'être : Superphenix avait été conçu pour produire du plutonium en grandes quantités. Aujourd'hui on le maintient péniblement en vie, soi-disant pour faire exactement l'inverse, soit détruire du plutonium, alors même qu'il représente un danger considérable. Entre-temps, il a coûté au moins 60 milliards de francs français (15 milliards de francs suisses) aux citoyens européens. Et qui peut chiffrer les coûts des programmes de recherche sur la fusion nucléaire contrôlée entrepris depuis plus de quarante ans sans réussir à produire le moindre kWh et sans grand espoir d'en produire jamais de manière commerciale ?

Si l'on veut éliminer les actinides, il faut, à mon avis, commencer par arrêter le nucléaire et, bien entendu, tout retraitement du combustible irradié. On sera alors confronté à une quantité définie d'actinides "disponibles" (non incorporés dans du combustible irradié). Si une variante du Rubbiatron pouvait alors être mise au point pour les éliminer, sans produire simultanément du nouveau combustible nucléaire, on pourrait en discuter.

P. Hlawa

L'AMPLIFICATEUR D'ÉNERGIE, PERSPECTIVES ET PROBLÈMES

Par P. Wydler, PSI*

Considérations générales

L'amplificateur d'énergie (AE) proposé par Carlo RUBBIA met en oeuvre, comme toutes les centrales nucléaires actuellement en service, l'énergie produite par la fission de noyaux lourds. Il générera par conséquent à peu de chose près les mêmes produits de fission que ces centrales. Les produits de fission sont responsables de deux problèmes importants propres à l'énergie nucléaire, à savoir l'évacuation de la chaleur résiduelle après arrêt de la centrale et la radiotoxicité des déchets⁽¹⁾.

La chaleur résiduelle est due à la désintégration radioactive des produits de fission. Elle doit pouvoir être évacuée, faute de quoi une fusion des éléments combustibles est à craindre. Quant à la radiotoxicité des produits de fission et des actinides contenus dans les éléments combustibles irradiés, elle détermine en bonne partie les risques liés à l'exploitation de la centrale et ceux liés à l'entreposage long terme des déchets radioactifs.

Caractéristiques principales de l'amplificateur d'énergie

Dans sa conception actuelle, l'amplificateur d'énergie a les caractéristiques principales suivantes (voir aussi Annexe 1) :

- Le spectre d'énergie des neutrons est celui d'un réacteur à neutrons rapides.
- Le refroidissement est assuré par un métal liquide, en l'occurrence du plomb.
- L'évacuation de la chaleur se fait par convection naturelle.
- Il dispose de systèmes de sécurité passifs.
- Le combustible nucléaire est à base de thorium.

Les deux premières caractéristiques placent l'AE dans la catégorie des réacteurs rapides refroidis par métal liquide. A la différence des autres réacteurs de cette catégorie comme, par exemple, Superphenix, l'AE est utilisé en mode sous-critique⁽²⁾ et a besoin d'une source de neutrons extérieure. Celle-ci est générée, dans le cas particulier, par un accélérateur de protons⁽³⁾.

* Traduction de l'Annexe A du Rapport PSI 96-17 : Fortgeschrittene nukleare Systeme im Vergleich. September 96.

Tout réacteur de fission peut en principe être utilisé en mode sous-critique, auquel cas il doit pouvoir disposer d'une source de neutrons extérieure. D'où le nom de "système hybride" donné à un tel ensemble. Les neutrons peuvent être fournis par un processus de spallation, comme cela est prévu pour l'AE, mais ils peuvent aussi bien provenir d'un processus de fusion.

Pour toutes les caractéristiques principales évoquées plus haut, l'amplificateur d'énergie, tel que proposé, met en oeuvre des solutions non conventionnelles, dont certaines ont été jugées peu prometteuses dans le cas de la technique nucléaire courante (p.ex. le refroidissement par le plomb). D'autres ont été considérées comme relevant d'un futur assez lointain (p.ex. le cycle du thorium). Une appréciation de l'AE exige donc de passer ces solutions en revue les unes après les autres.

Spectre d'énergie des neutrons

L'AE a été conçu comme une source d'énergie nucléaire pour le long terme devant produire des déchets de radiotoxicité réduite. C'est pour cette raison qu'il doit fonctionner avec des neutrons rapides, lesquels permettent d'assurer la transmutation du thorium 232 en uranium 233 fissile, et l'"incinération" des transuraniens, très radiotoxiques, lesquels se retrouveraient sans cela dans les déchets radioactifs. La contrepartie en est que, comme pour tous les réacteurs à neutrons rapides, la configuration des éléments combustibles dans le coeur de l'AE n'est pas celle correspondant à une réactivité maximale. Il s'ensuit que des déplacements accidentels d'éléments dans le coeur du réacteur peuvent conduire à une augmentation de puissance (excursion nucléaire). Le fait que le réacteur soit dans un mode sous-critique, joint à l'utilisation de diverses mesures de sécurité passives, rend ce risque très peu probable, sans toutefois pouvoir l'exclure de manière déterministe. L'AE se distingue en particulier par le fait que la sûreté par rapport aux excursions de puissance repose, pour l'essentiel, sur des propriétés "inhérentes" à la machine elle-même (voir aussi sous "source de neutrons extérieure").

Refroidissement au plomb

Le plomb a été pris en considération dès les débuts de l'énergie nucléaire comme alternative au sodium pour l'évacuation de la chaleur produite par les éléments combustibles. Cette option n'a guère été poursuivie que dans l'ex-Union Soviétique. D'un point de vue technique, le refroidissement au plomb pose des problèmes tout aussi difficiles que le refroidissement au sodium.

En ce qui concerne la sûreté, le plomb a sur le sodium l'avantage d'avoir une température d'ébullition plus élevée et une moindre réactivité avec l'air. Un autre avantage, souvent évoqué, des réacteurs refroidis au plomb est dû au fait qu'une perte partielle de réfrigérant entraîne une augmentation de réactivité moins grande que dans les autres réacteurs à neutrons rapides (void effect)⁽⁴⁾. Cet avantage n'est cependant pas très déterminant dans le cas de l'AE.

La grande densité du plomb ($10,6 \text{ gr/cm}^3$) a comme inconvénient de conduire à une forte pression statique. Par ailleurs, le plomb liquide n'est pas compatible sans autres avec les matériaux des structures. Les problèmes de corrosion dans les réacteurs refroidis au plomb ne sont pas complètement connus à ce jour et peuvent, le cas échéant, exiger des limitations de la température du réfrigérant, lesquelles pourraient ne pas être compatibles avec le refroidissement par convection naturelle⁽⁵⁾ prévu pour l'AE. Du fait que les réacteurs refroidis aux métaux liquides ne peuvent être inspectés que de manière très limitée⁽⁶⁾, les phénomènes de corrosion risquent de provoquer de graves problèmes de sûreté. Du point de vue de l'exploitation, la température de fusion élevée du plomb (327°C) est un inconvénient, puisque, même à l'arrêt, il est nécessaire d'assurer en tout temps et dans toute la masse du réfrigérant une température plus élevée que le point de fusion de ce dernier.

Une comparaison des avantages et inconvénients respectifs du refroidissement au plomb ou au sodium est rendue difficile de par la grande différence dans le développement de ces deux techniques. Il est possible que tout n'ait pas encore été dit sur les réacteurs refroidis aux métaux liquides. Néanmoins, le développement du refroidissement au plomb exigerait un investissement considérable, sans que l'on puisse garantir qu'il en résulterait un progrès réel pour la technologie nucléaire.

Transport de chaleur par convection naturelle

La circulation dans le circuit de refroidissement primaire de l'AE est assurée par convection naturelle uniquement. Cela permet de se passer d'une pompe de circulation. L'évacuation de la chaleur produite dans le coeur du réacteur se fait donc par un système purement passif (ne nécessitant par d'apport extérieur d'énergie). La grande masse de réfrigérant (10'000 tonnes) fait que le circuit primaire ne réagit que lentement à des perturbations dans la production ou l'évacuation de la chaleur.

Mais ces avantages ont leur prix : la cuve du réacteur a 30 m de haut et doit résister à une pression statique de plus de 30 bar. Cela compromet un des avantages importants du refroidissement par métal liquide, qui est de ne pas avoir à mettre le circuit de refroidissement primaire sous pression. La stabilité thermohydraulique du circuit

le plomb

primaire de l'AE vis-à-vis de fluctuations brusques doit être démontrée. La circulation par convection naturelle exige, de plus, une différence de température importante (200 °C) entre le point chaud et le point froid du fluide caloporteur, ce qui peut provoquer des contraintes difficiles à maîtriser. Et, finalement, si l'on veut pouvoir assurer les réparations éventuelles du circuit primaire, il faudra que la hauteur de la cuve soit répercutée sur celle du bâtiment qui abritera le réacteur, lequel sera par conséquent très coûteux.

La circulation purement naturelle du circuit primaire de refroidissement prévue dans l'AE permet de mieux maîtriser certains "transitoires" accompagnés d'une panne complète des systèmes d'arrêt - par exemple le transitoire particulièrement dangereux "loss-of-flow without scram"- (perte de circulation sans arrêt immédiat). Les accidents consécutifs à ce type d'événement ne représentent cependant qu'une faible partie du risque "résiduel". Il est en effet admis que l'évacuation de la chaleur émise dans les éléments combustibles par la radioactivité après l'arrêt du réacteur est tout aussi importante de ce point de vue que le fonctionnement fiable du système d'arrêt. Tous les réacteurs modernes refroidis par métal liquide sont conçus de manière à ce que cette évacuation de chaleur puisse se faire par circulation naturelle. Mais cela n'exige pas, comme avec l'AE, une cuve particulièrement grande, si bien que la configuration relativement compacte des coeurs de réacteurs refroidis par métal liquide permet aussi de limiter le volume des bâtiments qui les abritent.

Systèmes de sûreté passifs

L'AE est bien doté en systèmes de sûreté passifs. Ceux-ci reposent en partie sur des concepts provenant du développement de l'ALMR⁽⁷⁾ et en partie sur des concepts propres au projet lui-même.

On relèvera d'abord que l'AE n'a pas de barres de contrôle⁽⁸⁾, ce qui élimine totalement le risque d'une éjection de telles barres. Malgré cela, trois systèmes d'arrêt indépendants et totalement différents sont prévus (absorbeurs actionnés par voie mécanique normale, absorbeur sphérique mu par gravité, absorbeur libéré par la dilution thermique du plomb surchauffé). Il est clair que l'AE est de ce fait peu sensible à des excursions transitoires de puissance induites par des variations de réactivité et que sa sûreté d'arrêt est très élevée.

L'évacuation de la chaleur résiduelle après arrêt est assurée par le système dit RVACS repris de l'ALMR. Cette évacuation est mise en route sans intervention humaine, la dilatation du plomb surchauffé provoquant son écoulement dans l'espace annulaire entre la cuve du réacteur et la cuve de sécurité. Il en résulte un pont thermique entre

les deux cuves, ce qui permet à la chaleur résiduelle d'être évacuée par convection naturelle de l'air autour de la cuve extérieure.

Le cycle du thorium

Les réserves mondiales d'énergie théoriquement disponibles sous forme de thorium sont au moins aussi grandes que celles théoriquement disponibles sous forme d'uranium. C'est pourquoi les pays qui disposent d'importantes réserves de thorium, mais qui n'ont par contre pas d'uranium, se sont depuis longtemps intéressés au cycle thorium-uranium 233 (en bref cycle du thorium). Comme les isotopes naturels du thorium ne sont pas fissiles, et comme le seul isotope fissile disponible dans la nature est l'uranium 235, il peut sembler plausible que le cycle uranium-plutonium ait été mis en oeuvre en premier. On s'est cependant trompé quant à l'urgence de la mise en service des surgénérateurs avec, comme conséquence, la constitution d'un stock considérable de plutonium fissile. Ce stock peut raisonnablement être utilisé pour démarrer le cycle du thorium. L'AE est un moyen de réaliser cette mise en route. Mais d'autres systèmes, plus conventionnels, sont également concevables. La question est de savoir si le cycle du thorium a des avantages suffisants pour justifier les coûts élevés que sa mise au point va exiger.

En ce qui concerne les aspects liés à la prolifération des différents cycles de combustible nucléaire, une étude a été menée dans le cadre de l'AIEA entre 1977 et 1979⁽⁹⁾. Les résultats de cette étude peuvent être considérés comme valables encore aujourd'hui. Ils montrent bien qu'il s'établit progressivement des différences entre le cycle uranium-plutonium et le cycle du thorium, mais que les problèmes de fond ne peuvent pas être résolus en passant du premier au second. La maîtrise du problème de la prolifération exige, outre des conventions et des contrôles internationaux, que les quantités de matières fissiles en circulation, ainsi que leur transport, soient minimisés. Ces quantités sont à peu près les mêmes dans les deux cycles. Dans le cas de l'AE, le détournement de matière fissile est rendu plus difficile, du fait que le combustible nucléaire reste 5 ans dans le réacteur.

Un argument souvent cité en faveur du cycle du thorium est qu'il ne produit que peu d'actinides. Cet argument laisse de côté le fait que les produits de fission sont pratiquement les mêmes dans les deux cycles et que les isotopes U^{233} , U^{234} et Th^{231} créés dans le cycle du thorium génèrent également des produits de désintégration radiotoxiques. Des analyses plus détaillées montrent (voir Annexe 2) que la toxicité du combustible dans le cycle du thorium n'est pas aussi différente qu'on aurait pu penser de celle du combustible dans le cycle uranium-plutonium. Le cycle du thorium augmente même les risques liés à un dépôt définitif. D'autres études sont nécessaires

pour confirmer ces résultats. Mais il est déjà clair, à ce stade, que le cycle du thorium ne permet pas un bond en avant vers une énergie nucléaire "propre".

Source de neutrons extérieure

Un système critique, avec un facteur multiplicatif des neutrons $k_{eff} = 1$, réagit à une augmentation de la réactivité par une augmentation exponentielle de la puissance. Si l'excédent de réactivité dépasse la marge permise par la fraction de neutrons retardés, fraction correspondant à une modification de k_{eff} de l'ordre du pour-mille, l'augmentation est très rapide et conduit à une excursion de puissance. Dans un système sous-critique, la marge de réactivité déterminante est plus grande et dépend de manière linéaire et non pas exponentielle de l'intensité de la source extérieure. La question est de savoir dans quelle mesure le système doit être sous-critique et quelle est l'augmentation de sûreté qui en résulte.

Il s'avère que, pour des raisons liées au bilan énergétique, la valeur de k_{eff} ne devrait pas être inférieure à 0,95. Une première analyse des transitoires⁽¹¹⁾ montre qu'une valeur $k_{eff} = 0,99$ produit déjà une atténuation efficace. Avec $k_{eff} = 0,98$, l'AE se trouve dans le domaine moyen supérieur du facteur multiplicatif. D'autres analyses sont nécessaires pour quantifier le gain de sûreté de manière précise.

Le concept même de l'AE implique que le facteur de multiplication des neutrons reste constant pendant le fonctionnement du réacteur et ceci malgré l'empoisonnement progressif par les produits de fission. Des simulations mathématiques sont présentement faites à l'AIEA pour vérifier ce point crucial.

Le facteur de multiplication détermine la puissance de la source de neutrons extérieure. Des études faites au PSI [1,2] ont montré que l'accélérateur de protons nécessaire à la production des neutrons est réalisable.

Les avantages de l'AE ne doivent pas faire oublier ses inconvénients, ni les problèmes techniques et les problèmes de matériaux qui se posent dans le voisinage de la cible. Les inconvénients proviennent de la plus grande complication du système, de la nécessité d'une enceinte de protection supplémentaire pour le faisceau de protons et de la diminution de rendement global⁽¹²⁾, laquelle aboutit nécessairement à une plus grande production de déchets radioactifs et à des rejets de chaleur dans l'atmosphère plus élevés que ceux des centrales nucléaires conventionnelles.

Protection contre des impacts extérieurs

Les installations nucléaires modernes doivent être bien protégées contre des impacts extérieurs. Si l'AE est effectivement muni d'une enceinte de confinement, celle-ci n'est pas conçue pour résister à l'impact d'un avion. Le poids et la hauteur de la cuve du réacteur sont défavorables en cas de tremblement de terre. La protection contre ces derniers est censée être assurée par des isolateurs sismiques, mais il n'existe aucune analyse qui confirmerait l'efficacité de ces isolateurs.

Il est vraisemblable que, pour l'AE, la probabilité d'une détérioration du coeur due à une cause interne soit très faible. Il est d'autant plus souhaitable que la sûreté sismique soit déterminée sur la base d'un tremblement de terre de référence relativement fort. Or, c'est la norme américaine⁽¹³⁾, qui correspond à une intensité d'environ 8,5 sur l'échelle MSK, qui a servi de base au dimensionnement. La probabilité d'une intensité plus grande est tout de même $2 \cdot 10^{-5}$ /an sur le plateau suisse⁽¹⁴⁾. Il y a lieu de relever que cette probabilité ne dépend pas fortement de l'intensité du tremblement de terre : une unité supplémentaire dans l'échelle MSK, soit un doublement de l'accélération, correspond à une diminution de la probabilité d'un facteur 10.

Conclusions

L'AE se distingue pour la mise en oeuvre d'un grand nombre d'options peu courantes, qui n'ont jusqu'ici pas été utilisées à grande échelle dans la technique nucléaire. Comme les autres réacteurs à fission, il n'échappe pas au problème de l'évacuation de la chaleur résiduelle et celui de la toxicité du combustible. On ne peut donc pas le considérer comme une source d'énergie de type entièrement nouveau. Par ailleurs, le cycle du thorium ne permet pas un bond quantitatif vers une énergie nucléaire "propre".

Comparé aux réacteurs nucléaires usuels, l'AE a de nombreux avantages, mais aussi des inconvénients, et leur appréciation respective va demander encore un certain temps. Du fait des nombreux systèmes de sûreté passifs et des propriétés de sûreté intrinsèque de l'AE, la probabilité d'une destruction du coeur due à des transitoires d'origine interne paraît extrêmement faible. La protection contre les impacts venant de l'extérieur paraît cependant moins bien assurée. Le développement de l'AE étant à ses débuts, on ne dispose pas d'analyses de sûreté suffisamment bien étayées.

L'AE en est au stade de l'étude de concept. Pour l'amener au stade de l'installation commerciale, un vaste programme de R+D est nécessaire. Les questions qui se posent

concernent la technique du refroidissement au plomb (corrosion), la stabilité de la convection naturelle dans des réservoirs de grande hauteur, la neutronique des coeurs de réacteur sous-critiques, le couplage d'accélérateurs et de réacteurs à fission (problèmes de matériaux et de résistance mécanique), ainsi que le combustible à base de thorium (extraction du thorium, fabrication des éléments combustibles, retraitement, élimination des déchets, données pour les calculs de physique des réacteurs).

L'expérience dont on dispose avec les réacteurs conventionnels, particulièrement les réacteurs rapides, laisse à penser que le développement va prendre beaucoup de temps. Le groupe d'étude de C. Rubbia a fait quelques premières estimations de coûts et conclut que l'AE est économiquement rentable. Cela est cependant difficile à prouver à ce stade et il y a beaucoup d'incertitudes. La question de la durée de développement et de la rentabilité sont cependant à relativiser, puisque l'AE apparaît davantage comme une alternative au surgénérateur à neutrons rapides que comme une alternative au réacteur à eau légère.

Il faut finalement tenir compte du fait qu'il existe d'autres concepts hybrides qui s'insèrent mieux dans la technique nucléaire actuelle. Des réacteurs sous-critiques à neutrons rapides pourraient être utilisés pour l'incinération "sûre" d'actinides "élevés" (à No atomiques) élevés, seule une petite partie des réacteurs usuels devant être remplacée par des réacteurs hybrides. Les réacteurs hybrides en question pourraient mettre en oeuvre des technologies éprouvées (comme, par exemple, le refroidissement au sodium) et pourraient donc être développés avec un investissement comparativement modeste.

Après une longue période de stagnation, l'initiative de C. Rubbia a apporté un nouveau souffle sur la scène nucléaire. Au vu de l'énorme potentiel énergétique de l'uranium et du thorium, il y a lieu de considérer cette initiative de manière positive, quitte à remettre certaines options en question.

P. Wydler

Notes

- (1) Les éléments lourds dans le combustible (actinides) contribuent également au problème de la radiotoxicité.
- (2) La réaction en chaîne dans le réacteur ne se maintient pas d'elle-même.
- (3) Des protons à haute énergie produisent des neutrons dits "de spallation" en frappant les noyaux d'une "cible".
- (4) Cette comparaison entre coeurs de réacteurs de dimensions semblables refroidis respectivement au sodium ou au plomb, est valable seulement s'ils ne sont pas trop grands.
- (5) Pour fonctionner, la convection naturelle exige une grande différence de température dans le réfrigérant.
- (6) Les métaux liquides ne sont pas transparents.
- (7) L'ALMR (Advanced Liquid Metal Reactor) est un élément du concept américain de l'"Integral Fast Reactor".
- (8) Dans les systèmes sous-critiques, le facteur de multiplication des neutrons est mesuré "on line" par une méthode dynamique.
- (9) International Nuclear Fuel Cycle Evaluation, IAEA, Vienna 1980.
- (10) Etude en cours de P. Wydler et E. Curti, PSI.
- (11) Divers travaux de H. Rief, JRC/ISPRA, et de H. Takahashi, BNL.
- (12) Une partie de l'électricité produite sert à faire fonctionner l'accélérateur.
- (13) On admet que le dimensionnement sismique satisfait à l'US AEC Regulatory Guide 1.60.
- (14) Estimation basée sur une étude de Säggerer/Mayer-Rosa sur les dangers liés aux tremblements de terre en Suisse.

Références

- [1] Th. Stambach et al. "Potential of Cyclotron Based Accelerators for Energy Production and Transmutation". Int. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Las Vegas, July 1994.
- [2] Th. Stambach et al. "The 0.9 MW Proton Beam at PSI and Studies on a 10 MW Cyclotron", 2nd Int. Conf. on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar 1996.
- [3] C. Rubbia et al. "Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier". CERN/AT/95-44(ET), Geneva, September 1995.

Annexe 1 : Caractéristiques de l'Amplificateur d'Energie (Energy Amplifier)
(chiffres d'après [3])

10

Caractéristiques du réacteur	
Type de réacteur	réacteur hybride refroidi au plomb
Puissance électrique (MWe)	625
Puissance thermique (MWth)	1500
Réfrigérant	plomb liquide
Modérateur	(plomb liquide)
Densité de puissance moyenne ¹ (W/g)	55
Pression du réfrigérant (bar)	30
Nombre de systèmes d'arrêt indépendants	3 (passifs)
Coefficient de température du combustible ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	-1.38×10^{-5}
Coefficient de température du modérateur ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	-1.37×10^{-6}
Coefficient de densité du modérateur (m^3/kg)	9.68×10^{-7}
Cycle du combustible	fermé
Type de combustible (fertile/fissile)	Oxyde (TH232/U233)
Masse de combustible ¹ dans le coeur (t)	27.3
Durée de vie d'un coeur (a)	5
Taux de combustion moyen (GWd/t)	100
Pertes de combustible au retraitement (kg/a)	0.5
Radiotoxicité des déchets ² (Sv/Mol)	
après 1'000 ans	4800
après 1'000'000 ans	720
Mesures contre la prolifération	changement de combustible seulement tous les 5 ans
Disponibilité des ressources	pratiquement illimitée
Sûreté	
Potentiel d'excursion de puissance	très faible
Potentiel de panne d'évacuation de la chaleur	très faible
Développement	
Directeur de projet	Carlo Rubbia
Etat du projet	étude de concept
Possibilités de réalisation	
Coûts	rentable selon les concepteurs du projet
Technologie	à peine éprouvée

¹ Ramenée au combustible sous forme d'oxyde.

² Actinides en quantités stationnaires après plusieurs recyclages (calculs du PSI).

Annexe 2 : Radiotoxicité du combustible et risques long terme d'un dépôt définitif

11

L'amplificateur d'énergie est un système destiné à l'utilisation à long terme de l'énergie nucléaire. Cela signifie que le combustible doit être retraité et recyclé. Il s'établit alors, après environ 50 ans, un équilibre dans la composition du combustible, laquelle peut être estimée par le calcul. Dans l'hypothèse que les pertes au retraitement et à la fabrication du combustible sont les mêmes pour le thorium et pour l'uranium, le PSI a obtenu les radiotoxicités des déchets données ci-dessous (calculs non publiés) :

Temps (années)	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷
Uranium ¹ (Sv/kg)	5.2x10 ⁶	2.9x10 ⁶	8.8x10 ⁵	3.2x10 ⁵	1.6x10 ⁴	1.2x10 ³	1.4x10 ²
Uranium/Thorium ²	5.1	6.0	43.6	7.9	0.3	0.4	13.4

¹ Radiotoxicité des actinides dans le combustible à l'uranium

² Rapport des toxicités: combustible à l'uranium/combustible au thorium

Il s'avère que les différences entre les cycles de combustible ne sont pas aussi grandes qu'on aurait pu le penser et que l'uranium est même plus favorable dans l'intervalle de temps 100'000 à 1 millions d'années.

L'estimation du risque du dépôt définitif a été établie pour la "zone proche" à l'aide des modèles et avec les paramètres utilisés dans l'analyse de la CEDRA "Kristallin-I" (CEDRA NTB 93-22). Les doses individuelles annuelles calculées pour le cas d'une libération directe des déchets sont données ci-dessous :

	Dose maximale ¹	Moment dans le temps (a)
Cycle Uranium-Plutonium	3.3	2.5 x 10 ⁵
Cycle Thorium-U233	22.9	3.2 x 10 ⁵

¹ Ramené au maximum correspondant à une composition d'actinides du type "Kristallin-I".

Dans les deux cas, c'est le Ra226 qui est déterminant pour les doses. Le précurseur responsable est U234. Ce résultat signifie que le thorium ne peut pas simplifier les problèmes liés à un dépôt définitif. Pour qu'il puisse le faire, il faudrait que les pertes de combustible nucléaire soient systématiquement plus faibles dans le cycle du thorium que dans celui de l'uranium-plutonium. Or, d'après les connaissances actuelles, il n'y a pas de raison qu'il en soit ainsi.