

Entretien avec Sébastien Balibar

Jeudi 9 juin 2005

Présents : Anne Francastel, Delphine Pichot, Virginie Vivalda

Sujet : ITER

Point départ : article de Sébastien Balibar, Yves Pomeau et Jacques Treiner, publié dans Le Monde le 24 octobre 2004 et intitulé « La France et l'énergie des étoiles ».

Question : Vous parlez dans votre article des générateurs de 4^e génération. Qu'est-ce que c'est ?

Réponse : Je souhaiterais tout d'abord rappeler une chose : nous avons beau être contre le projet ITER, tel qu'il est en tout cas, nous sommes quand même pour le développement et l'amélioration de la filière nucléaire à fission, c'est-à-dire classique.

Réacteur de 4^e génération est le nom qui est employé à la fois par les technologues et par les gens de Bruxelles, c'est-à-dire d'Euratom qui est une organisation européenne qui s'occupe de l'énergie nucléaire. Cela inclut un ensemble de nouveaux types de réacteurs mais ceux auxquels je pense sont des réacteurs qui vont brûler l'intégralité de leurs déchets lourds.

Les réacteurs à fission produisent des déchets lourds en particulier du plutonium, qui est un élément lourd, situé vers le bas du tableau. Il a l'inconvénient d'être à la fois très radioactifs et pendant très longtemps. Ce sont ces éléments qu'on appelle les déchets C : il y a A, B, C par ordre de toxicité et de dangerosité. Les déchets C ce sont les pires, c'est ceux dont on ne sait pas quoi faire. Il y a une idée qui me semble très bonne qui est de les transformer en combustibles et donc de rebrûler tout ce qu'on fabrique et de fonctionner ainsi en circuit fermé à quantité de plutonium et d'autres éléments radioactifs lourds constante.

Il y a deux solutions pour faire cela : il y en a une qui se déroule dans ce qu'on appelle des réacteurs à neutrons rapides dont le principe est celui de Phénix et Super Phénix qui étaient deux centrales expérimentales construites en France. Super Phénix a été arrêté, et je le regrette, pour des raisons politiques par la gauche à un moment où il y avait à faire un nécessaire compromis entre les socialistes et les Verts. Les Verts, qui sont des anti-nucléaire par principe, ont exigé l'arrêt de Super Phénix qui avait quelques problèmes techniques qui, je crois, étaient en train d'être résolus. En particulier ces réacteurs utilisent des neutrons rapides donc des neutrons qui ont plus d'énergie que les neutrons qu'on appelle thermiques de centrales classiques : ces neutrons rapides bombardent beaucoup les enceintes du réacteur et c'est sans doute à cause de cela qu'il y avait des fuites dans le circuit de refroidissement. Le refroidissement de ces centrales à neutrons rapides posait donc des problèmes. L'hiver on prit alors prétexte du fait qu'il y avait des problèmes techniques et que assez souvent on arrêtait Super Phénix pour réparer et recommencer pour dire : « Cela marchera jamais, il faut le détruire, l'arrêter, et cetera ». C'est dommage parce que les réacteurs à neutrons rapides sont justement une des manières de rebrûler tout le plutonium.

En transformant tous ces déchets lourds en combustibles, d'une part on résout le problème des déchets, on arrête d'en accumuler, et d'autre part on augmente énormément la quantité de combustible disponible. Si on ne rebrûle pas tout le plutonium et autres éléments du même type que produit la fission dans les centrales habituelles, on arrive assez vite à extinction de toutes les ressources naturelles en uranium. Si on continue à brûler ainsi de l'uranium, il n'y en a plus dans quelques centaines d'années. Mais en revanche si on recycle tout le produit de l'utilisation de l'uranium, c'est-à-dire justement tout ce plutonium, alors on en a pour plusieurs milliers d'années. Cela devient donc une source d'énergie beaucoup plus d'avenir

que si on ne rebrûle pas les déchets. Le fonctionnement de ces centrales de 4^e génération, dont que je viens d'essayer de décrire l'une d'entre elles, consiste à recycler tous les déchets en les transformant en combustible grâce à une fission différente qui produit ce qu'on appelle des neutrons rapides.

Il y a un autre type de centrale de 4^e génération qui est à l'étude en ce moment et qui utilise la fission du thorium à la place de celle de l'uranium qui produit du plutonium. Le thorium est un autre élément qui à condition d'être bombardé par des neutrons devient radioactif. C'est une technologie différente : les neutrons ne sont pas rapides, ils sont thermiques. Cela a donc l'air moins dangereux mais il faut faire circuler le thorium sous forme de sel fondu, ce qui n'est pas encore au point. Un programme de recherche européen dans le cadre d'Euratom et des programmes de recherche de l'Europe étudie cet autre sorte de réacteur de 4^e génération qui de la même manière réutiliserait tous ses déchets pour en faire du combustible et donc résoudrait le problème majeur du nucléaire qui est, à mon avis, le problème des déchets.

Question : Que fait-on du plutonium aujourd'hui ? Est-il stocké quelque part ?

Réponse : Pour l'instant, on accumule presque tout le plutonium qu'on produit. Je crois savoir que, en France, on en a accumulé 120 tonnes. 120 tonnes, ce n'est pas tellement parce que le plutonium est très lourd, cela fait quelques mètres cube. Il est stocké dans une piscine à la Hague. En fait on recycle déjà un peu ce plutonium. Le parc central français utilise un combustible qu'on appelle MOX, qui contient 30% de plutonium. On en réutilise donc déjà un peu mais pour vraiment tout réutiliser, il faut un autre type de centrales qui est à l'étude et qui fait partie de ce qu'on appelle les réacteurs de 4^e génération.

Question : Si on investissait dans les réacteurs de 4^e génération et qu'on continuait à les développer, dans combien d'années peut-on penser qu'ils seraient prêts ?

Réponse : Ce sont des recherches en cours. Je crois, même si je n'ai pas les chiffres en tête, que l'Europe investit beaucoup moins dans la recherche sur les réacteurs de 4^e génération que dans le projet ITER qui est quand même très cher à l'échelle de la recherche. Mais comme cela est très cher, que cela a l'air très nouveau et très grand, c'est plus facile à vendre auprès de politiques ou de technocrates qui ne connaissent pas la physique ou la technologie et qui se disent « C'est nouveau, c'est moderne, c'est grand, c'est le soleil, c'est l'eau de mer,... ». C'est absurde.

C'est pour cela que nous avons fait cet article, pour essayer d'expliquer que si on revient aux problèmes scientifiques ou technologiques, on s'aperçoit que les réacteurs de 4^e génération sont susceptibles de marcher dans quelques dizaines d'années peut-être, alors que la fusion thermonucléaire, cela ne marchera sûrement pas avant 50 ans. Nous expliquons dans une partie de notre article que le problème du réchauffement de la planète est urgent et qu'il faut donc trouver des solutions bien avant 50 ans sans quoi le réchauffement de la planète va s'accélérer.

Question : Ne faudrait-il pas à la fois faire ITER pour se projeter plus loin dans le futur et également développer la 4^e génération pour nous ?

Réponse : Peut-être. Il y a une question de chiffres là dedans. Le coût total d'ITER est 5 milliards d'euros de construction plus 5 autres de fonctionnement, ce qui fait en gros 10

milliards d'euros. Je crois que c'est dans cet article-là qu'on considère la part que paye la France et ce que cela représente.

Ce que nous avons voulu dire en comparant le coût d'ITER d'une part aux crédits des labos comme ici et d'autre part aux coûts des avions de chasse, c'est que, si on compare à la recherche qui est menée dans des labos, c'est très cher. Nous avons donc peur que, en particulier dans la région Provence Alpes Côtes d'Azur mais de même en Ile-de-France, les labos qui reçoivent des subventions de leur région pour leurs recherches se voient répondre que, non, la région a investi déjà tellement dans la construction d'ITER, qu'il n'y a plus d'argent pour eux.

C'est ce qui s'était déjà passé au moment d'un autre projet pharaonique que nous avons essayé de critiquer au passage : la station spatiale internationale. Cela a coûté des fortunes effroyables et n'a servi absolument à rien. Chaque fois que mes amis astrophysiciens voulaient envoyer un appareil intéressant pour faire des mesures soit du ciel soit de la Terre, on leur disait « Je suis désolé, on a déjà dépensé tout pour la station spatiale ». Nous craignons qu'il se passe la même chose pour les labos de recherche en France, et même dans d'autres pays, qu'on leur dise « Ecoutez, on n'a plus d'argent pour vous puisqu'on a déjà ITER sur les bras ».

Mais, et c'est là où j'en arrive enfin à votre question, si on compare le coût de ITER avec des tas de choses qui coûtent beaucoup plus cher, comme, par exemple, l'entretien du parc d'avions de chasse de l'armée de l'air en France, on s'aperçoit qu'ITER, pour la France, c'est un avion par an. Un avion rafale coûte 150 millions d'euros. Un avion Airbus A380 coûte 300 ou 400 million d'euros. Si on se met à comparer à d'autres choses, au budget de la France, ou même à ce dont on a beaucoup parlé ces temps-ci qui est les bénéfices des sociétés françaises cotées en bourse au CAC 40 : ces sociétés ont fait 60 milliards d'euros de bénéfice en 2004. Vous voyez bien que dépenser 100 millions pour construire ITER, c'est un 600^e des bénéfices des sociétés du CAC 40, qui n'est pas l'ensemble des sociétés françaises puisqu'il y a aussi toutes les PME qui ne sont pas cotées en bourses.

Tout cela pour dire que si vous me dites « ITER en soi, on ne sait jamais, cela pourrait être intéressant, on pourrait faire les deux », je suis d'accord, prenons l'argent au ministère de l'armée et achetons un avion de moins par an, formidable ! En attendant, nous avons voulu donner des arguments scientifiques sur ce qu'est ITER parce qu'ils n'étaient pas présents dans le débat et que nous le regrettons.

Question : La fission serait-elle capable de palier le manque d'énergie fossile indéfiniment ?
Ou a-t-elle aussi ses limites ?

Réponse : Notre point de vue est qu'il faut arrêter de brûler des combustibles fossiles. Cela doit se comprendre vers la fin de l'article. Cela nous paraît être le point de départ. Pour être plus précis, il faudrait diminuer par deux aussi vite que possible l'émission de CO₂. Comme la consommation d'énergie dans le monde augmente, premièrement parce que la population augmente, deuxièmement parce que le niveau de vie d'un certain nombre de pays qui sont en train de se développer, comme la Chine, l'Inde, le Brésil et quelques autres, augmente, la consommation d'énergie totale de la planète va doubler dans les 50 ans. Si on veut diviser par deux la quantité de CO₂ produite, il faut donc diviser par 4 la proportion de combustibles fossiles dans l'énergie qu'on brûle.

Pour diviser cette consommation par 4, il n'y a pas une seule solution à notre avis, mais une combinaison. Je ne pense pas que le nucléaire soit la seule solution, parce que cela fait trop de production d'énergie nucléaire.

Je pense que premièrement, il faut changer le mode de vie afin de faire des économies d'énergie partout où l'on peut, c'est-à-dire arrêter de prendre l'avion pour faire Paris-Londres ou Paris-Amsterdam et prendre le train, arrêter d'habiter à 50 km de son lieu de travail et venir en 4X4 en ville, changer le mode d'habitat, arrêter d'acheter sans arrêt des choses car la construction de n'importe quelle chose, à commencer par un ordinateur, coûte beaucoup d'énergie, isoler les maisons, changer le mode d'éclairage des rues, bref, il y a des quantités d'endroits où l'on peut faire des économies d'énergie. C'est exactement ce que disent les écologistes. Au passage il faut aussi améliorer considérablement, et c'est faisable, le rendement des centrales classiques, thermiques c'est-à-dire utilisant le pétrole ou le charbon.

La première chose à faire ce sont des économies d'énergie, la deuxième chose c'est de trouver des énergies propres là où il y en a. On nous rebat les oreilles des éoliennes mais on ne pourra rien produire avec les éoliennes. La seule chose qui est abondante et qu'on pourrait développer c'est le solaire, car cela serait dommage de ne pas profiter de l'énergie solaire alors qu'il nous en arrive plein. Le seul problème est que les panneaux solaires coûtent cher. Il y a deux sortes de solaire : le solaire thermique qui n'est pas cher du tout et le solaire qui utilise les cellules photovoltaïques et grâce auquel on peut produire de l'électricité. Malheureusement transformer le rayonnement en électricité coûte encore cher. Cependant mon intime conviction est que si l'Europe investissait dix milliards d'euros dans l'amélioration de la technologie des panneaux solaires, sous forme d'un grand centre de recherche, d'une usine de production en région Provence Alpes Côtes d'Azur, ce serait fantastique : on prendrait une avance technologique essentielle pour le monde entier. J'ai lu il n'y a l'autre jour un article d'un américain là-dessus : il l'air de dire que le prix des photopiles solaires continuait à diminuer et c'est pour cette raison qu'il fallait se lancer dans cette voie.

Bref, on propose trois choses : faire des économies d'énergie, développer le nucléaire même si on ne peut quand même pas le développer au point qu'il remplacerait tout le reste, et développer le solaire.

Question : Dans votre texte, vous dites qu'on n'a pas encore réussi à trouver des matériaux pour confiner l'énergie. Où en est la recherche aujourd'hui ?

Réponse : C'est une question très centrale pour la fusion et qui m'intéresse beaucoup. Il faut dire que j'en ai appris beaucoup plus encore, parce que cet article a eu un certain impact. Entre autres, j'ai été invité à France Culture en novembre à un débat contradictoire avec Monsieur Jean Jacquinnot, qui était le directeur pour l'Europe d'ITER. Je m'attendais à ce qu'il me dise «Écoutez, bon, finalement on sait tout là-dessus». En fait, je me suis aperçu qu'il était comme moi, c'est-à-dire qu'il était d'accord que ce problème de matériaux n'était pas résolu du tout.

ITER c'est un tore immense, c'est à dire une espèce d'anneau creux. A l'intérieur de celui-ci, il y a un plasma qui est formé de tritium et de deutérium. Mais avant de mettre du tritium, ils vont déjà étudier le plasma pendant longtemps avec que du deutérium. Ce plasma doit tourner très vite pour être très chaud et pour que cela tourne très vite, il faut que ce soit sous ultravide, autrement s'il y a des gaz résiduels, il y a des collisions, ce qui empêche de chauffer le plasma. Quand on met du tritium et que la réaction de fusion nucléaire démarre, cela produit des neutrons qui sont dix fois plus énergétiques encore que les neutrons rapides, dont je vous ai parlé tout à l'heure à propos de Phénix, puisqu'ils font 14 MeV au lieu de 2. Ces neutrons de 14 MeV sont tellement énergétiques que l'on ne connaît aucun matériau qui résiste.

Il faut donc protéger l'extérieur : il y a une enceinte en acier inoxydable qui rend le tout étanche, on la protège avec une espèce de sandwich, c'est-à-dire une double couche qui va faire tout le tour. Cette double couche contient à l'intérieur du lithium qui circule : c'est ce

qu'on appelle la couverture, en anglais, la «blanket». Le lithium a pour but d'arrêter les neutrons pour que ceux-ci ne viennent pas taper sur l'enceinte extérieure. Sa deuxième fonction est de produire le tritium dont on a besoin pour faire le combustible. On se paye la tête de Raffarin qui dit que le combustible c'est du deutérium et qu'il y en a plein dans l'eau de mer. Mais non, ce n'est pas vrai. Pour le deutérium, d'accord, c'est facile ; mais il faut aussi du tritium. Et il en faut tellement qu'il faut que chaque centrale future produise son propre tritium. Pour cela on utilise une réaction nucléaire qui est la suivante : un neutron fusionne avec du lithium pour fabriquer du tritium. On extrait le tritium au fur et à mesure que le lithium absorbe des neutrons et le transforme en tritium et en hélium.

Le problème est que cette couverture, cette «blanket», ce sandwich toroïdal qui sert de protection et aussi d'usine à produire du tritium, est irradiée. Il ne faut donc pas que le lithium et l'hélium qui circulent à l'intérieur du sandwich toroïdal fuient vers l'intérieur, mais il faut quand même que les neutrons rentrent. Il y a donc là une paroi en acier qui va être horriblement irradiée par des neutrons de 14 MeV : elle va casser. Qu'est-ce qui se passe quand un acier est bombardé par des neutrons ? D'une part chaque choc déplace les atomes, donc imaginez votre métal en principe étanche donc chaque atome à chaque collision se déplace de plusieurs mailles atomiques.

Je ferai mieux de faire un dessin.

[Sur le dessin de la section du tore] Si les neutrons tapaient directement sur la paroi, cela casserait assez vite et il faudrait tout reconstruire. On met une double couche à l'intérieur qu'on va changer de temps en temps et qui va servir à protéger l'extérieur, mais aussi à produire du tritium. Le problème est qu'il ne faut pas que le lithium fuie non plus.

Question : C'est-à-dire que les neutrons passent à travers la barrière de lithium ?

Réponse : Oui, les neutrons vont sûrement être arrêtés par le lithium, ils ne vont pas aller plus loin. Il faut d'abord qu'ils passent à travers la première paroi et qu'ils n'aillent pas plus loin que la deuxième paroi.

Il faut que cette surface hyper étanche d'acier qui confine le lithium, le tritium et l'hélium reste étanche. Or que se passe-t-il dans un matériau quand un neutron arrive ? Chaque atome, sous l'impact, tape dans plein d'autres atomes. Toute la matière se déplace. De plus c'est très compliqué de changer le matériau, à l'intérieur, parce qu'il est irradié. Il faut donc envoyer un petit robot à l'intérieur, qui va, armé d'un chalumeau, découper cent mètres carrés de matériau irradié, les faire sortir, les mettre dans une poubelle, faire le ménage, rapporter cent mètres carrés de double couches qu'il va falloir ressouder au chalumeau pour que ce soit hyper étanche pour recommencer à faire circuler le lithium.

Question : Il faudra donc arrêter la centrale ?

Réponse : Exactement, il faut arrêter la centrale. C'est tellement compliqué de faire cela, qu'on ne va pas le faire tous les jours. Ils prévoient qu'on change la couverture tous les cinq ans. Le matériau en question subit donc des neutrons de 14 MeV sous haut flux pendant cinq ans. Je parle du régime futur.

ITER va mettre quelques grammes de tritium dans vingt ans pour voir ce que cela donne. Mais ITER n'est pas encore le prototype d'une future centrale à fusion, qui commencerait à faire tourner du tritium en continu. Dans une vraie centrale, on estime à 150 dpa l'irradiation de ce matériau. Cela veut dire que chaque atome au bout de cinq ans aura été déplacé 150 fois d'une quantité qui est environ une maille atomique. Voyez-vous donc un peu ce qui se passe

dans ce matériau qui doit rester hyper étanche, où chaque atome a été déplacé 150 fois de la distance entre ses voisins.

Le résultat est que ce matériau gonfle d'environ 30%. Des chercheurs ont commencé à étudier cela et ont regardé si cela restait mécaniquement solide : ils ont trouvé que oui, à peu près. Mais personne n'a étudié si ce matériau gonflé par cette irradiation restait étanche à l'ultravide. Il faut que cela soit étanche à l'ultravide, sinon le plasma ne tourne pas.

Il y a un projet international, IFMIF, qui vise justement à étudier ce problème de matériaux. IFMIF coûte 10% du prix d'ITER. Le problème est que ITER, cela fait mieux et donc on construit ITER avant même de concevoir IFMIF pour voir si on sait fabriquer un matériau sans lequel c'est impossible de garder ce plasma sous ultravide.

On était d'accord sur tout cela avec M. Jacquinet sur France Culture jusqu'à ce qu'il dise ensuite au restaurant : « Vous savez, en fait, ce problème de déplacement par atome n'est rien par rapport au problème de l'hélium. ». Le problème de l'hélium est le suivant : quand vous irradiez un acier, il y a un certain nombre d'atomes, dont le fer, je crois, tout simplement, qui sont rendus radioactifs. Parmi tous ces éléments radioactifs, il y en a qui sont radioactifs alpha, c'est-à-dire qui produisent des particules alpha, autrement dit des noyaux d'hélium. A l'intérieur de ce matériau irradié, on produit donc de l'hélium. L'hélium se regroupe en petite bulles et les bulles d'hélium, évidemment, gonflent. Si on ne trouve pas un moyen de les faire sortir, le matériau explose. Quand on regarde sur le site d'ITER, ils nous disent qu'on va faire un matériau poreux parce qu'ainsi, l'hélium va pouvoir sortir au lieu de casser le matériau. Là je leur ai dit : « Mais comment faites-vous pour fabriquer un matériau qui est à la fois poreux pour faire sortir l'hélium et super étanche pour que ce soit en ultravide ? ». Ils m'ont répondu : « On a des pistes. ». J'ai ri.

Ce que nous voulons dire dans cet article, c'est qu'avant de construire la Ferrari, on devrait construire les pneus, c'est-à-dire étudier ce matériau, trouver je ne sais quoi mais qu'ils nous prouvent qu'ils savent faire des matières très étanches avec des degrés d'irradiation comme cela.

Question : Ils vont commencer à construire IFMIF en même temps qu'ITER ?

Réponse : Je pense qu'il aurait fallu commencer par cela mais, pour l'instant, les négociations internationales piétinent...

Ce que nous voulons dire dans l'article, c'est qu'IFMIF coûte dix fois moins cher. Si on ne sait pas résoudre ce problème, ce n'est pas la peine de construire ITER. Je trouve donc qu'on aurait mieux fait de construire IFMIF d'abord et de voir ensuite.

Mais après tout, c'est toujours le coup des avions de chasse : ce n'est que 10 % de plus, donc si on peut faire tout à la fois, allons-y.

Question : Est-ce que vous pensez qu'on arrivera à trouver le matériau adapté ?

Réponse : L'un d'entre nous, Yves Pommeau, a fait un article dans la Recherche il y a vingt ans où il expliquait que, si on ne résolvait pas ce problème de matériaux, la fusion nucléaire n'avait aucun avenir. Cela fait vingt ans et depuis vingt ans, on n'a jamais eu d'idée de matériau génial qui permette de résoudre cela.

Question : Il y a donc des chances que d'ici cinquante ans, on n'ait pas trouvé le bon matériau ?

Réponse : Je crois que, s'ils trouvent, c'est vraiment génial, ils sont très forts. Mais il faut avoir une idée révolutionnaire, une idée scientifique. On essaie aussi d'expliquer dans cet article qu'il y a des problèmes qui ont l'air technologiques et qu'il ne suffit pas de dire : « C'est un problème technologique, on sait toujours résoudre ». Non, ici c'est vraiment un problème de physique : il faut inventer un matériau étanche sous irradiations monstrueuses. A mon avis, enfin à ma connaissance, personne n'a vraiment d'idées de ce qu'il faut faire, en tout cas depuis le temps qu'on en parle et qu'ils nous disent qu'ils cherchent... Yves Pommeau, lui, est sûr qu'il n'y a pas de solution.

Question : Qu'il n'y aura jamais de solution ?

Réponse : Oui, qu'il n'y aura jamais de solution.

Question : ITER ne servira donc jamais à rien ?

Réponse : Non, ITER ne servira à rien, si ce n'est à apprendre deux ou trois petites choses sur la stabilité du plasma, qui est d'ailleurs un domaine intéressant. En tout cas, il y a une mauvaise foi qui nous dérange, nous scientifiques, quand on dit qu'on justifie ITER en expliquant que c'est « l'énergie du soleil dans votre cuisine » pour expliquer qu'on dépense 5 milliards d'euros ou plus, alors que les problèmes ne sont pas résolus. C'est pour cela qu'on s'est un peu fâchés, le jour où la France a décidé que pour l'emploi en région PACA et le prestige, il fallait doubler la contribution de la France au budget d'ITER afin que cela se construise en France et pas au Japon.

Question : Il y a également un problème pour la production du tritium. Vous dites qu'on ne peut pas le produire en grandes quantités et que là aussi il faut faire des recherches pour savoir comment le produire en grandes quantités.

Réponse : Oui, effectivement. Ce n'est peut-être pas un problème aussi difficile que le problème des matériaux, mais quand même, personne, jusqu'à maintenant, n'a montré la faisabilité d'une filière de production de tritium. Ils ont seulement des idées sur la manière dont on pourrait s'y prendre.

Les quantités de tritium dont on a besoin sont colossales. Nous avons écrit dans l'article, je crois, 56 kg, mais en fait c'est plutôt une centaine. Le tritium, on en a pour les bombes H. Il y a donc des réacteurs canadiens et des réacteurs militaires secrets je ne sais pas où qui ont produit un peu de tritium pour les bombes H. La quantité disponible dans le monde entier est d'une vingtaine de kilos. Si un seul réacteur à fusion en a déjà besoin entre 50 et 100 kg et qu'il faut construire des centaines de réacteurs à fusion, même plus, je suppose, il faut que chaque réacteur produise son tritium. Il faut donc mettre au point toute cette histoire de capture de neutrons par le lithium qui est plus subtile que ce que je vous ai dit parce qu'il y a aussi du béryllium pour multiplier les neutrons.

Question : Quel est le problème posé par la production du tritium ?

Réponse : Il faut mettre au point un système de circulation sous irradiation forte de lithium avec exactement le bon nombre de neutrons par rapport à la bonne quantité de lithium pour extraire le tritium au passage.

Question : Est-ce que le lithium est inépuisable ?

Réponse : Rien n'est inépuisable, mais il y a quand même beaucoup de lithium.

Question : A partir du lithium, on pourrait donc produire du tritium en quantités suffisantes ?

Réponse : A condition de mettre au point la méthode.

Question : La méthode n'est pas au point ?

Réponse : Oui. ITER va mettre un peu de lithium d'ici vingt ans, quand ils auront fini la construction, puis l'étude de la stabilité du plasma avec seulement du deutérium. Cela va commencer à faire de la fusion nucléaire et produire des neutrons. Ils vont regarder ce qu'il se passe quand cela irradie tout l'environnement mais ils disent que ce n'est pas la même chose que de mettre au point la production massive de tritium nécessaire pour un fonctionnement en continu.

Il faudra donc faire d'autres recherches.

Question : Le principal but d'ITER est-il donc uniquement d'étudier l'évolution des plasmas ?

Réponse : Quand on parle avec les physiciens qui sont impliqués dans ITER, ce sont tous des physiciens des plasmas. Jean Jacquinnot en est un par exemple. Ce sont des gens qui s'intéressent à la physique de la stabilité du plasma. La question est de savoir si ce plasma reste sous la forme d'un anneau qui tourne ou s'il éclate dans tous les sens comme un milieu turbulent qui produit de l'énergie à l'intérieur. Il y a tout un tas d'instabilité. Après tout, même dans le soleil, il y a plein d'instabilités : des explosions, des éruptions solaires...

Ils veulent donc étudier un problème de stabilité, qui est un problème de d'hydrodynamique d'un plasma très chaud.

Question : Est-ce que vous pensez qu'on aurait pu faire la même chose avec un autre réacteur plus petit ?

Réponse : C'est ce que disent certains Américains. Je n'en sais rien. Mais effectivement, il y a des Américains qui disent qu'on pourrait étudier cette instabilité de plasma avec une machine plus petite. Je me méfie, ce n'est pas forcément vrai. De toute façon, j'ai un peu tendance à dire que la stabilité du plasma est intéressante à maîtriser si on veut construire une centrale à fusion, mais qu'autrement, ce n'est pas le premier but du siècle. C'est la même critique que j'ai sur la station spatiale internationale. Mme Claudie Haigneré, ancienne ministre de la recherche, est allée deux fois là-haut. Qu'est-ce qu'elle y a fait ? Elle a étudié sa propre santé. Quand les cosmonautes montent dans la station spatiale internationale ou quand

ils vont dans l'espace, ils sont soumis à deux choses abominables. Premièrement, ils sont complètement irradiés par les rayons cosmiques. C'est d'ailleurs pour cela que les personnels navigants d'Air France et d'autres compagnies n'ont pas le droit de voler trop souvent. Il ne faut pas non plus se faire faire trop de radios car, à la longue, on finit par avoir un certain risque de cancer. Donc les cosmonautes qui montent là haut sont sans protection dans les rayonnements cosmiques : c'est extrêmement dangereux. La deuxième chose est que les cosmonautes n'ont pas de gravité. Ils ont les os qui arrêtent de les porter, donc ils décalcifient. Mais tout cela, ce sont des problèmes de cosmonautes. Ce que je veux dire, c'est que si on n'envoie personne dans l'espace et qu'on n'envoie que des robots, c'est bien mieux. On n'a pas besoin de s'intéresser à la santé des cosmonautes en orbite. Ce n'est pas un problème intéressant.

De même ici, je trouve que si on ne construit pas une centrale à fusion thermonucléaire, la stabilité du plasma, je m'en fous.

Question : Un des grands avantages d'ITER serait que la fusion ne produirait presque pas de déchets. Est-ce un leurre ?

Réponse : Ce n'est pas vrai que cela ne produit pas de déchets mais cela ne produit pas des déchets lourds très dangereux. Par exemple, quand j'expliquais que le fer était irradié et qu'il devenait radioactif, vous voyez bien que cela produit de la radioactivité, mais ce sont des déchets qu'on appelle B dans les centrales nucléaires classiques. Il y a plein de choses qui sont irradiés et qui ne sont pas du plutonium qui lui est très radioactif pendant 24 mille ans. On peut mettre ces déchets de côté et au bout d'un certain temps, ils ne sont plus dangereux. La Terre elle-même est remplie d'éléments radioactifs. Vous et moi sommes tous radioactifs : on a une radioactivité naturelle, qu'on connaît très bien et qu'on peut très bien mesurer. Au fond de la Terre il y a déjà plein de radioactivité. Donc mettre des déchets de radioactivité moyenne au fond de la Terre, à mon avis, n'est pas un problème.

Mais les éléments lourds comme le plutonium, c'est très radioactif, très chaud, et pendant extrêmement longtemps. On ne peut donc pas le cacher dans un puits, fermer, et attendre. Cela n'est pas sérieux, personne ne veut faire cela en ce moment. Ce sont des déchets lourds, dangereux, des déchets C qui ne sont pas produit par la fusion. Donc effectivement il est vrai que la fusion produit moins de saletés qu'une centrale à fission classique.

Question : Par exemple, si on arrivait à développer les réacteurs de quatrième génération, quand on les arrêterait, on aurait quand même du plutonium ?

Réponse : Oui, effectivement. A supposer que dans cinq mille ans on décide de passer à autre chose que le nucléaire de quatrième génération, il va falloir à la fin quand même brûler tout ce plutonium qui sera encore plus ou moins là. Mais je pense qu'on peut faire cela progressivement, au fur et à mesure que les centrales s'arrêtent. Il faut donc arrêter les centrales une par une pour avoir un stock de plutonium qui devient de plus en plus faible. Enfin, il y a aussi des méthodes pour incinérer ces déchets lourds et les transformer en déchets moins lourds.

Question : Pourrait-on réutiliser le plutonium déjà produit aujourd'hui par les centrales classiques ?

Réponse : Bien sûr.

Question : Cela permettrait de recycler le plutonium qu'on ne sait pas où mettre.

Réponse : Absolument. Non seulement c'est une bonne question mais cela soulève une difficulté.

L'une des raisons pour lesquelles, dans cet article, on raconte que mieux d'utiliser du thorium, est que, pour fonctionner en circuit fermé avec le couple uranium plutonium, il faut quand même beaucoup de plutonium, c'est-à-dire, à l'échelle de la France, environ 800 tonnes. 800 tonnes, en volume, ce n'est pas dramatique mais c'est plus que les 120 tonnes totales qu'on a accumulées depuis le début de l'utilisation du nucléaire en France. Or, la filière au thorium aurait besoin de beaucoup moins de ces combustibles radioactifs lourds pour fonctionner en circuit fermé. De plus, ce serait l'uranium 233 qui jouerait le rôle du plutonium 239. Or l'uranium 233 est un élément dont on ne peut pas faire des bombes. C'est pour cela que le thorium nous paraît avoir plus d'avenir, peut-être, que la filière actuelle, qui utilise l'uranium 235 et le plutonium 239.

Question : Avez-vous eu beaucoup de réactions à cet article ?

Réponse : Pas beaucoup, non. Mais un peu quand même, heureusement. Il y en a eu plusieurs sortes de réactions.

Les pouvoirs politiques ont été absolument silencieux. Les gens du CEA, visiblement, nous ont considérés avec beaucoup de sérieux. C'est plutôt bien de leur part. Je pense que c'est parce qu'on est toujours en cours de négociation pour localiser ITER et que cela faisait mauvais effet que, en France, candidat pour la construction d'ITER, il y ait des scientifiques qui parlent contre ITER. Il y a des scientifiques japonais qui parlent aussi contre ITER. Et quand il y avait une candidature espagnole, il y a eu un article dans el Pais qui, pareil, faisait l'écho d'arguments semblables aux nôtres.

Les gens du CEA nous ont donc contactés pour discuter. Ils voulaient nous convaincre de l'intérêt de leur machine. La discussion a été en fait organisée par la presse qui s'est saisie un peu de cette affaire, comme par exemple France Culture. Le débat de France Culture est une des choses qui m'a fait le plus plaisir. C'était un débat scientifique intéressant, on a parlé sérieusement des aspects scientifiques et technologiques d'ITER. Ce n'était pas du tout un échange agressif de slogans ou d'arguments démagogiques quelconques. Non, c'était une vraie discussion avec un journaliste du Monde très bien qui s'appelle Michel Darventi. C'était très utile.

Par ailleurs, il y a eu d'autres réactions dans mon milieu de chercheur : il y a beaucoup de gens qui m'ont écrit que je ne connaissais pas forcément et qui m'ont dit qu'on faisait honneur à notre profession parce qu'ils ne nous trouvaient pas corporatistes. On s'est permis de critiquer une machine qui est considérée comme une machine de recherche pour des physiciens selon beaucoup de gens. C'est pour la physique des plasmas. En critiquant ITER, on critique certains de nos propres collègues. Le fait donc que l'on fasse cela au nom d'une sorte de vérité scientifique, a fait que beaucoup de gens dans notre milieu nous ont dit : « C'est bien, vous gardez votre lucidité d'esprit. Vous arrêtez, comme tout le monde l'a fait avant, d'être silencieux sur ITER parce que c'est de la physique avec des physiciens donc on ne dit pas du mal de la famille. ». Cela m'a fait plaisir aussi.

Enfin il y a eu une part des réactions de gens qui sont plutôt des anti-nucléaires, des « écolos » variés, mais qui se trompent sur ITER. Ils ont essayé de nous récupérer. Il s'agit de radios, de

gens qui, soit n'ont pas vu la dernière phrase de l'article qui dit qu'il faut développer les réacteurs de 4^{ème} génération et qui considèrent que l'énergie nucléaire c'est de la folie, soit l'ont lu et nous critiquent fortement en nous accusant d'ambiguïté par rapport au nucléaire. On nous injurie dans des articles sur Internet.

Une revue globale Chance, dirigée par Benjamin Dessu, qui est un écolo antinucléaire, a essayé de nous faire écrire avec eux. J'ai refusé mais Jacques Treiner a accepté. Je crois qu'il a eu tort et je trouve cela un peu dommage qu'il se retrouve avec des antinucléaires.

Comme c'est l'année de la physique, il y a eu dernièrement pas mal de bars des sciences et des salons de rencontre où des scientifiques discutent avec les gens. J'ai été ainsi invité à parler d'énergie. Je me suis rendu compte que les gens ont beaucoup d'a priori sur le nucléaire. Ils ont peur que Tchernobyl se reproduise en France. Les personnes les plus antinucléaires sont souvent des jeunes gens qui fument comme des pompiers. Je trouve cela très agaçant parce que l'impact du tabac en terme de cancer est incomparable avec l'éventuelle présence de Césium 137 dans les montagnes du Mercantour qu'a pu provoquer Tchernobyl.

Je trouve tout de même que cet article a provoqué l'imagination des gens, les a poussé à discuter et leur a donné l'occasion de parler du nucléaire, et notamment des méthodes pour détecter la radioactivité. Ces méthodes physiques de détection de la radioactivité sont, au passage, extrêmement précises. Elles peuvent être utilisées dans un tas de domaines, même pour vérifier la date à laquelle un vin a été fait.

Question : Y a-t-il beaucoup de scientifiques qui partagent votre point de vue sur ITER ?

Réponse : Mon impression est que tout le monde est d'accord sauf les physiciens des plasmas. Personne au départ ne voulait en parler. Vous savez, quand on travaille, on veut être tranquille. Pour faire de la recherche, on a besoin qu'on nous laisse tranquille. Quand on commence à dire des choses en public, cela nous occupe un certain temps et cela nous empêche de travailler.

La deuxième raison est qu'ils hésitent à dire du mal de leurs collègues, les physiciens des plasmas, à critiquer des gens que l'on connaît bien et que l'on respecte.

Pour ces deux raisons, la communauté des physiciens n'a pas voulu s'exprimer. Mais le jour où la France a décidé de doubler le budget accordé à ITER, nous nous sommes décidés à parler et à dire que cela suffit. Ainsi la très grande majorité est d'accord avec nous.

Il est vrai que certains pensent que l'argument économique ne tient pas mais sur le fait qu'ITER ne marchera pas avant 50 ans, si ce n'est jamais, tout le monde s'accorde.