

M. TOINET, qui préside, ouvre la séance et passe la parole à M. Hervé de VITRY qui présente le premier orateur de l'après-midi, M. Pietro CAPRIOGLIO, directeur scientifique de l'établissement de PETTEN, du Centre Commun de recherches Euratom. M. CAPRIOGLIO va parler des réacteurs à gaz à haute température dans les programmes d'Euratom.

Monsieur le Président, Mesdames et Messieurs, je crois qu'il est utile de dire brièvement les raisons qui ont amené à étudier les réacteurs à gaz à haute température. On connaît déjà les réacteurs à gaz et je crois que les industriels français sont peut-être, ou même sûrement, dans nos Communautés, les gens qui connaissent le mieux les réacteurs à gaz, tout court, modérés au graphite, réacteurs qui constituent la filière la plus importante du Commissariat français.

Ces réacteurs ont eu un succès indisputable tant en France qu'en Angleterre, mais on s'aperçoit d'une certaine limitation de leurs possibilités soit en rendement, soit en coûts d'investissement. Ce sont des réacteurs à uranium naturel, ce qui représente un très grand avantage, mais ce sont aussi des réacteurs dont la puissance volumique assez faible en quelque sorte, les possibilités de réduction des coûts d'investissement (+). C'est un peu avec cette préoccupation de réduire le coût d'investissement que depuis plusieurs années déjà, en Angleterre, les responsables de l'U.K.A.E.A. ont attaqué le problème de réduire les coûts d'investissement en augmentant les puissances volumiques de ces réacteurs et aussi leur rendement, moyennant une augmentation de température. Cela a fait naître deux filières qui sont liées et qui découlent de la filière gaz-graphite, que nous connaissons tous assez bien. Ce sont les filières A.G.R. (Advanced gas-cooled reactor) et la filière "Dragon".

(+) à moins de monter considérablement dans les puissances unitaires.

La filière A.G.R. n'a pas suscité beaucoup d'intérêt en Europe continentale. Des difficultés d'ordre technologique telles que la corrosion du graphite par le CO^2 dans des conditions de densité de puissance beaucoup plus grandes que dans le cas des réacteurs actuellement en service pour le C.E.G.B. (Central Electricity Generating Board) et en voie d'entrer en fonction progressivement pour l'Electricité de France, ont limité en quelque sorte l'intérêt technologique des réacteurs A.G.R. Les difficultés rencontrées pour mettre au point des gaines au béryllium ont contribué à cette méfiance, disons, continentale, vis-à-vis de cette filière. Mais surtout, le point important, c'est que les techniciens et les hommes d'affaires de la Communauté ne semblent pas être particulièrement intéressés par les avantages économiques promis par cette nouvelle filière qui se présente en Angleterre. Je rappelle que le Commissariat à l'Energie atomique en France l'avait étudiée très sérieusement dans le cadre d'un projet relatif à la propulsion navale nucléaire, le projet de pile à moyenne température, et qu'après une étude assez longue, des difficultés de jugement intrinsèques à une technique si nouvelle, il a décidé de ne rien en faire et de poursuivre plutôt le développement de la filière avec gaines au magnésium.

Au contraire, l'U.K.A.E.A., en Angleterre, a vigoureusement continué son programme de réacteurs à moyenne température, et cela a abouti à une certaine divergence d'opinion qui fait l'objet de beaucoup de publicité entre l'U.K.A.E.A., qui croit encore sérieusement à l'intérêt économique de l'"advanced gas-cooled reactor" et le Central Electricity Generating Board, le client, qui réserve son jugement et attend, avant d'acheter, que cet intérêt apparaisse avec plus d'évidence.

Parallèlement à ce développement de réacteur à moyenne température - et je rappelle par parenthèses qu'Euratom n'a démarré aucun programme en ce domaine, suivant en quelque sorte la ligne continentale de pensée - parallèlement donc en Angleterre, une nouvelle filière plus avancée, très originale et plus audacieuse, avait commencé à se faire jour, c'était le programme H.T.G.R. Dans ce programme, les avantages d'ordre économique paraissaient, au moins au début, très clairs. On augmentait considérablement la densité de puissance du cœur ce qui permettait en principe, une réduction considérable des coûts d'investissement. De plus, on utilisait un cycle au thorium - uranium 233, ce qui permettait des coûts de cycle de combustible comparables sinon inférieurs à la filière à uranium naturel.

Il y avait par conséquent, au début au moins, un espoir très clair d'avantage économique important. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle Euratom et d'autres pays dans le cadre de l'O.C.D.E. ont décidé de se joindre à cette initiative anglaise et de démarrer ce qui est connu maintenant sous le nom de "Projet Dragon". Celui-ci existe depuis trois ans et, jusqu'ici le travail excellent qui a été réalisé ne laisse pas craindre que les espoirs du début doivent subir une révision sérieuse.

Je crois qu'il serait bon, cependant, d'approfondir un peu les avantages potentiels de cette filière et surtout les difficultés rencontrées et les inconvénients nouveaux qui se sont présentés, de façon à vous donner une idée un peu plus claire et précise de ce qui peut être tiré de la lecture de documents qui, quelquefois présentent un point de vue un peu trop optimiste sur cette famille de réacteurs. J'essaierai donc d'être le plus objectif et honnête possible dans cette évaluation.

La perspective de diminution sérieuse du coût d'investissement dans le cas "Dragon", a, je crois, des chances de se confirmer pour autant qu'on utilise des combustibles qui retiennent les produits de fission.

Je dois faire, ici, une très brève digression. Il y a eu une alternative, qui existe d'ailleurs toujours, entre la possibilité d'utiliser des éléments de combustible qui laissent sortir les produits de fission, permettant un dépoisonnement du coeur et par conséquent des burn-up très élevés et des coûts des cycles de combustible relativement faibles, et, au contraire, des éléments de combustible qui retiennent les produits de fission, ce qui entraîne des coûts de cycles de combustible qui risquent d'être plus élevés, mais aussi du fait d'avoir un circuit primaire inactif, des coûts d'investissement aussi intéressants qu'on avait l'espoir de les obtenir au début. C'est un peu cette deuxième ligne qui a été suivie ces derniers temps à "Dragon" et je me limite, par conséquent à celle-ci.

Les coûts d'investissement, donc, devraient être - pour autant que de nouvelles difficultés n'apparaissent pas - inférieurs aux coûts d'investissement d'une centrale que j'appellerai classique

à gaz graphite avec des gaines en magnésium, type E.D.F. Des difficultés importantes dans ce domaine se sont cependant présentées. On a l'impression qu'elles ont été résolues, mais il est toujours difficile de donner des jugements définitifs tant qu'il n'y a pas d'expérience industrielle à large échelle qui puisse confirmer les espoirs d'aujourd'hui. Ces difficultés sont surtout liées à l'étanchéité du circuit primaire. On utilise de l'hélium à haute température et à pression relativement élevée. C'est un gaz très cher qui a, entre autres, une certaine tendance à fuir très vite par des orifices même très petits. Il faut par conséquent arriver à un degré d'étanchéité du circuit primaire nettement au-delà des techniques aujourd'hui utilisées dans n'importe quel autre type de réacteur. Ces difficultés ont été résolues d'une façon très satisfaisante, même supérieure à ce que l'on avait le droit d'attendre au niveau d'une installation pilote. Jusqu'à quel point ces difficultés pourront être surmontées à un coût raisonnable pour une installation industrielle, je ne le sais pas, mais je crois qu'il y a là des espoirs bien fondés. Si l'on vient maintenant aux problèmes liés au cycle de combustible, le choix que je viens de mentionner, notamment entre les combustibles qui laissent sortir les produits de fission et les combustibles qui les retiennent, une fois choisis les combustibles qui retiennent les produits de fission, on se trouve placé devant des difficultés assez grandes. Les produits de fission sont la cause la plus importante de défaillances dans les éléments de combustible et sont le facteur principal de limitation de la vie des éléments de combustible, tant à cause du dommage provoqué par leur énergie qu'à cause de leur accumulation.

Pour obtenir un cycle de combustible bon marché, surtout dans un cas comme celui-ci dans lequel on utilise un circuit au thorium avec un enrichissement initial assez important, il faut pouvoir obtenir des taux d'épuisement assez élevés. Or, le fait de retenir les produits de fission limite d'une façon sérieuse, a priori, le taux d'épuisement. On fait beaucoup de recherches sur ce point. Seule une information en provenance des Etats-Unis, il y a quelques mois, nous laisse de très bons espoirs : c'est le fait que pour la première fois, des éléments de combustible du type de ceux qui seront utilisés pour Dragon ont été soumis à un taux d'épuisement accéléré dans un réacteur américain et ont atteint un taux d'épuisement de l'ordre de 30 % des atomes.

Pour donner des chiffres plus faciles à comparer avec ceux que nous tous nous avons dans la tête, dans le cas d'un enrichissement de 10 % à l'origine avec 90 % de thorium dans le combustible, cela correspond à 3 fissions par atome fissile initial ou à quelque chose comme 300.000 mégawatts/jour par tonne. Il est clair qu'il s'agit là d'un taux d'épuisement qui dépasse très largement tout ce que l'on a l'habitude de considérer comme normal dans n'importe quel type de réacteur. S'il devait s'avérer qu'on puisse reproduire ce taux d'épuisement à l'échelle industrielle dans les conditions d'exploitation d'un réacteur de puissance (+), cela signifierait que le deuxième objectif, celui d'un cycle de combustible bon marché, aurait été atteint. Malgré ces sons de cloche tout à fait optimistes, il y a quand même encore des difficultés non résolues. Tout d'abord, les problèmes liés à la réactivité à long terme de ces réacteurs. Il est vrai que du point de vue métallurgique, on peut espérer des taux d'épuisement extrêmement élevés, mais on n'est pas encore sûr que la neutronique de ces réacteurs le permettra. En d'autres termes, il se peut que pour obtenir des taux d'épuisement assez élevés, on soit obligé d'introduire dès le début des excès de réactivité tellement importants que cela risque de donner des ennuis sévères aux problèmes de contrôle et de faire perdre une quantité importante de neutrons qui seraient absorbés par les barreaux de contrôle au début de la vie du coeur. Il y a encore des incertitudes liées à des données de base nucléaires que l'on ne possède pas encore et qui, par conséquent laissent une ombre sur ce que l'on peut espérer tirer de ces réacteurs.

Le deuxième problème que je tiens à mentionner est celui du contrôle. Vers la fin de la vie de ces coeurs, on ne sait pas encore si l'on peut compter sur un coefficient de température négatif ou si un coefficient de température positif est pratiquement inévitable. C'est une différence très importante pour le contrôle d'un réacteur. A mon avis, on ne risque pas ainsi de tuer la possibilité d'avoir des burn-up très élevés, mais sûrement d'avoir une incidence non négligeable sur le coût des installations de contrôle.

Je n'ai pas mentionné un développement important qui a été couronné par un succès partiel particulièrement remarquable à cause de la difficulté du problème : les travaux dans le domaine du graphite.

(+) sans contamination excessive du circuit primaire.

Si l'on veut avoir une rétention complète des produits de fission, il est presque inévitable de développer des graphites imperméables. Depuis le début, ces graphites ont été considérés comme indispensables pour la bonne réussite du projet. Une partie importante de ces travaux sont faits, pour le compte du projet Dragon, en France. Je ne pourrais pas dire que tous les problèmes ont été résolus. Il y a là encore un domaine de travail sérieux et sûrement il y aura lieu d'y dépenser beaucoup d'argent. La difficulté la plus grande qui subsiste encore concerne l'obtention de produits qui avaient à la fois une faible perméabilité et une bonne résistance au rétrécissement sous irradiation.

Une méthode pour atteindre des taux d'épuisement très élevés consiste à exécuter ce que les Anglais appellent le " shuffling " , un changement de place des éléments du combustible à l'intérieur du coeur. Il est très clair qu'au centre, l'uranium va brûler plus vite qu'au bord, du fait qu'il y a une certaine distribution de flux neutronique et aussi plus vite au centre qu'en haut et en bas du réacteur, ce qui signifie que si l'on peut assurer un bon roulement du combustible à l'intérieur du coeur, on gagne pas mal de réactivité à long terme.

C'est surtout avec ce souci en tête que les Allemands - et en particulier la firme B.B.C. Krupp - ont démarré depuis des années une étude en quelque sorte parallèle à l'étude Dragon et qui consiste à mettre au point un réacteur qui ressemble au réacteur Dragon pour beaucoup de caractéristiques , mais qui s'en différencie surtout par cet aspect essentiel qu'il permet un mouvement continu des éléments de combustibles. C'est ce que l'on appelle un réacteur à boulets. Sans doute, la plupart d'entre vous

./...

auront-ils eu l'occasion de voir un dessin au moins schématique de ce genre de réacteur. Tout simplement un tas de boulets s'écoule lentement dans le coeur, ces boulets étant enlevés périodiquement et continuellement en bas et ajoutés en haut. Dans un gros réacteur de puissance, on peut admettre qu'il y ait plusieurs centaines de milliers de boulets. Cela permet un bon roulement et une homogénéisation continue de la matière fissile. De la sorte, on gagne presque automatiquement un facteur 2 dans les taux d'épuisement qu'on peut espérer avoir à long terme. Naturellement, comme toujours, la solution d'un problème en ouvre d'autres, et l'on ignore jusqu'à quel point cette solution assez astucieuse du problème de la réactivité à long terme ne va pas amener à des complications mécaniques dans le coeur ou à des températures excessives des éléments de combustible, à cause des mauvaises caractéristiques d'échange thermique. Ce sont là justement des problèmes que la firme B.B.C.Krupp et le Gouvernement fédéral allemand se sont engagés à mettre au clair.

Euratom a toujours manifesté un intérêt très vif pour cette étude qui est évidemment liée très étroitement au projet Dragon et c'est dans cette optique que, dans le cadre de notre deuxième programme quinquennal, j'espère qu'une association liera Euratom à ce programme de développement de réacteur à boulets en Allemagne. Aussitôt après, l'une de nos tâches primordiales sera de bien coordonner les travaux entre le programme allemand et le programme Dragon auxquels nous allons participer d'une façon importante, de manière à éviter que les mêmes problèmes ne soient étudiés deux fois et à concentrer l'effort des uns et des autres sur les différences des deux projets, de façon à arriver, dans un temps que j'espère relativement bref - de l'ordre de quelques années - à se faire une idée la plus précise

possible des avantages et inconvénients des deux systèmes, et à un choix pour la continuation des efforts dans le domaine gaz haute température.

J'en arrive à mon dernier point. Ni B.B.C.Krupp, ni surtout Dragon, n'ont jusqu'à présent procédé à une évaluation industrielle assez détaillée de ce que peut coûter un gros réacteur de puissance utilisant cette technique. En d'autres termes, il n'y a jamais eu ce que les Américains appellent un "reference design", un projet de référence. On a toujours fait des estimations raisonnables, on est parti d'une opinion fondée sur des données bien claires, d'avis très raisonnables de personnes compétentes, mais on n'a jamais essayé de poser le problème pratiquement, sur la planche à dessin, pour voir où résident les difficultés, et tenter d'évaluer ce que cela peut coûter. Ce travail est maintenant en train de commencer pour Dragon. Il fera aussi l'objet d'une partie des travaux qui seront faits par B.B.C.Krupp en association avec Euratom. J'estime par conséquent que d'ici à un an, un an et demi, ou peut-être à l'occasion de votre prochaine visite à Euratom, on sera amené à vous donner les premières précisions sur l'ordre de coût d'une centrale de puissance à gaz à haute température.

M. de Vitry me rappelle qu'il faut vous laisser le temps de me poser des questions. Je m'arrête donc en souhaitant que vous m'aidiez à mettre en lumière les détails éventuels, voire les choses importantes, que j'aurais oublié de mentionner.

Q. Vous avez évoqué les problèmes de contrôle pour Dragon, mais, pour B.B.C.Krupp, ne sont-ils pas simplifiés ? Y a-t-il ou non des barres de contrôle dans le réacteur ?

.../...

R. Dans le cas du réacteur à boulets, les problèmes de contrôle sont sûrement simplifiés puisqu'on peut toujours jouer sur le niveau des boulets pour des grandes quantités de réactivité. Il est de toute façon nécessaire d'avoir des barres de contrôle - pour être plus précis, ce que les anglais et les américains appellent " shimrods ", pour les problèmes de démarrage et des pannes de " scramm".- Ceci étant, il y a des problèmes de contrôle dans les réacteurs à boulets qui sont moins importants en ce qui concerne la réactivité à long terme et la façon dont on peut la contrôler, mais on doit faire face aux mêmes problèmes de démarrage que dans n'importe quel autre réacteur.

Q. Où en est la réalisation du projet B.B.C. Krupp ? J'avais vu il y a quelques années les maquettes à l'exposition d'Essen. Depuis ce moment-là les choses ont dû progresser ; qu'a-t-on réalisé en fait d'études sur papier ou d'études de laboratoires ?

R. Il y a naturellement deux genres d'études: tout d'abord, une réalisation industrielle importante, un réacteur d'essai qui a l'ambition de produire de l'électricité (15 Megawatts); il est en construction et sera probablement fini dans le courant de 1964. Vraisemblablement pour la fin 1964, ce réacteur devrait être à même de commencer à fonctionner et à fournir quelques premiers résultats. En outre, des recherches sont en cours dans les laboratoires de B.B.C.Krupp, dans ceux du Centre nucléaire de Rhénanie du Nord/Westphalie à Julich et dans le cadre d'un contrat B.B.C.Krupp-Nukem pour le développement des éléments de combustibles. Dans ces trois catégories rentrent toutes sortes de développements, problèmes de soudure, d'échanges de chaleur, de production des boulets, de mesure de burn-up pour les boulets usés - car il faut savoir combien d'uranium ils contiennent - ,encore problèmes d'étanchéité, problèmes de cycles thermiques pour avoir une idée des meilleurs rendements qu'on peut espérer obtenir des gaz chauds à leur sortie du réacteur.

Q. Normalement, à quelle température doit-il travailler ?

R. On parle d'une température de sortie de 750°. A mon avis, cette température va décroître. Il y a plusieurs indices qui me laissent à penser qu'il n'est pas déraisonnable d'imaginer que d'ici à 1, 2 ou 3 ans, ces 750 ou 800° dont on parle encore aujourd'hui seront ramenés à 650°-700°. C'est du moins mon opinion

.../...

personnelle.

Q. Les boulets ont-ils toujours la même dimension ?

R. Les boulets ont des diamètres qui sont de l'ordre de 5 à 6 cm. C'est le résultat d'une optimisation assez complexe. Il faut qu'ils soient assez lourds pour ne pas être soufflés par le gaz. Il faut qu'ils ne soient pas trop gros pour ne pas avoir des températures trop élevées au centre. Il faut aussi que la surface disponible pour le gaz, la surface d'échange thermique, soit suffisamment grande ; il faut aussi prendre en considération le coût de fabrication, qui naturellement, augmente avec le nombre de boulets produits : si vous les faites gros, cela revient meilleur marché par kilogramme d'uranium. Toutes ces considérations amènent grosso modo à quelque chose qui est de l'ordre de quelques centimètres de diamètre.

Q. C'est Nukem qui étudie les boulets ?

R. Oui, c'est Nukem qui les a étudiés jusqu'à maintenant. Dans le cadre de l'association avec Euratom, cela fera l'objet d'une entreprise un peu plus vaste. Il y aura probablement des recherches qui seront faites directement par l'équipe commune Euratom/Allemagne.
