La chimie et les réacteurs nucléaires Conséquences à en tirer pour la formation des ingénieurs *

par E. Roth

(Professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers, Directeur de recherches à la Division d'études de séparation isotopique et de chimie physique du C.E.N. de Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex)

Introduction

Il n'est pas toujours facile, en 1980, à cause de l'évolution des techniques, de deviner si tel laboratoire que l'on traverse appartient à un physicien ou à un chimiste. Un signe pourtant ne trompe pas. Des étagères couvertes de flacons de réactifs caractérisent sans ambiguïté le domaine d'un chimiste. Mais la réciproque n'est pas vraie : leur absence n'est pas la marque sans équivoque d'un laboratoire de physique, surtout dans le domaine nucléaire.

Le mot réactif doit attirer notre attention sur les objectifs spécifiques des activités du chimiste, notamment l'identification de substances au moyen de réactions avec d'autres corps et l'étude des interactions au cours desquelles la nature des liaisons entre atomes change.

L'intérêt des chimistes s'est porté au début de l'ère nucléaire sur l'étude des changements de nature des noyaux produits non par des réactions traditionnelles entre corps purs ou composés, mais par l'interaction des éléments avec des particules ou rayonnements d'origine subatomiques, outils par essence des physiciens.

Du reste, certains de ceux-ci, et non pas des moindres, comme F. Joliot au Collège de France, choisissaient pour leurs laboratoires le nom de laboratoire de chimie nucléaire.

Et l'on sait bien que c'est sur des preuves purement chimiques, qu'en 1939, la découverte de la fission de l'uranium sous l'effet des neutrons a été établie. L'histoire se répétant parfois, en 1972 ce sont des identifications chimiques et isotopiques qui ont conduit à affirmer que des réactions en chaîne de fission s'étaient auto-entretenues il y a deux milliards d'années à Oklo, au Gabon, où avaient fonctionné, de ce fait, de véritables réacteurs naturels.

Malgré ce rôle historique, et bien que le grand public sache que des substances mystérieuses, comme l'eau lourde, jouent un rôle dans « le nucléaire » et sont préparées dans des usines chimiques, les manifestations extérieures, qu'évoque l'utilisation de l'énergie du noyau, sont la production de rayonnements, celle d'électricité, les explosions à buts militaires. Et, peut-être, parce que les installations nucléaires ne dégagent ni fumées rousses, ni ne laissent échapper de liquides nauséabonds, le rôle qu'y jouent les chimistes est souvent méconnu, je dirai, de ceux-là mêmes qui y travaillent.

Rôle de la chimie dans l'industrie nucléaire

Combien de fois ai-je entendu décrire Saclay comme un Centre consacré à la physique, et à un degré moindre à la biologie, oubliant non seulement la chimie, mais l'étude des matériaux.

Et pourtant, la Division de chimie du Commissariat à l'Énergie Atomique a eu, à elle seule, en 1979, un budget représentant près du quart du budget total du CEA civil, et ses laboratoires répartis dans tous les Centres du CEA occupent près de 1 800 personnes.

Un diagramme représentant les différentes

* *Présenté à la Conférence organisée, sous l'égide de l'UNESCO, par l'INSA de Lyon, en juin 1980.*

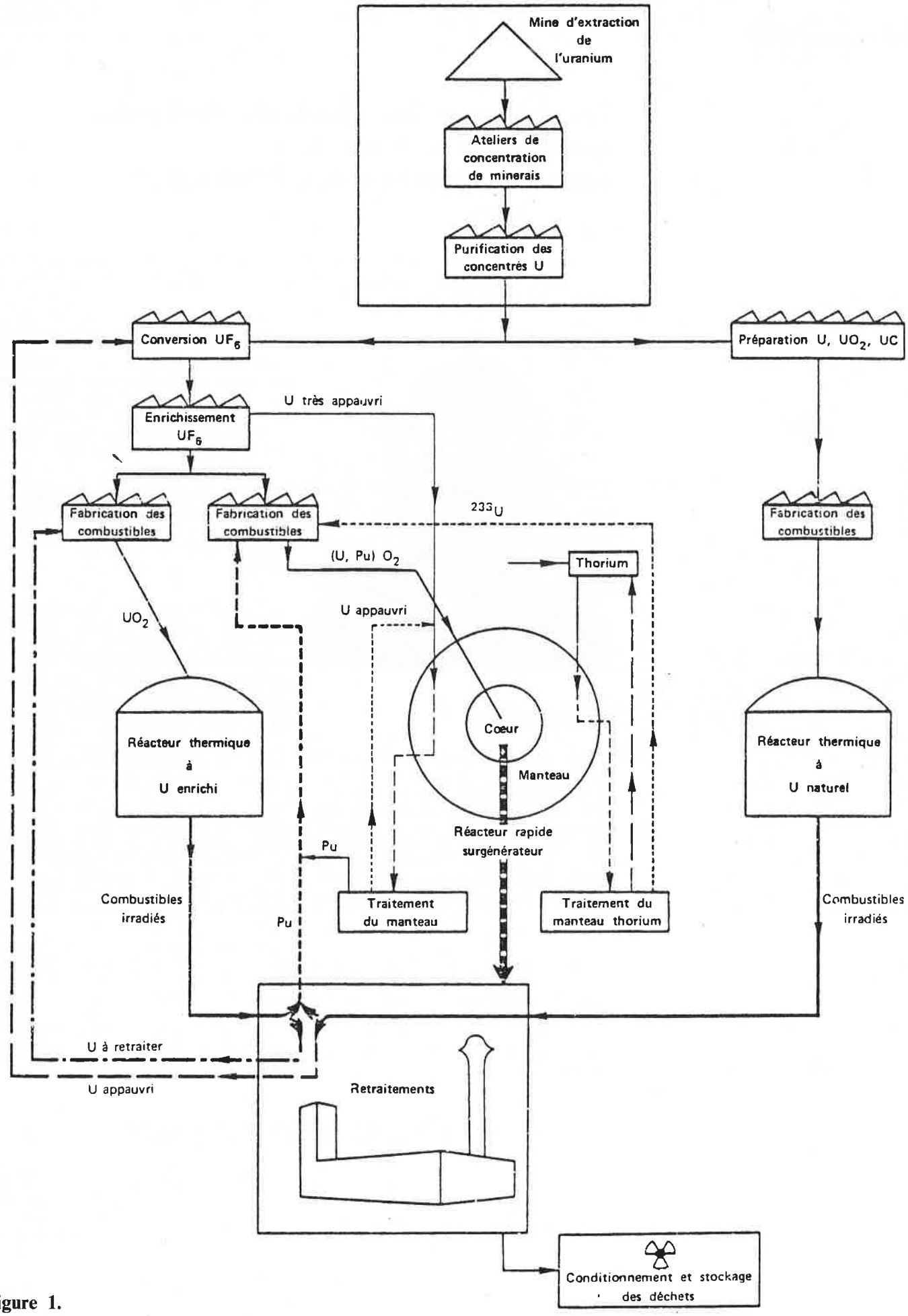

Mine d'extraction de l'uranium
Ateliers de concentration de minerais
Purification des concentrés U
Conversion UF_6
Préparation U, UO_2, UC
Enrichissement UF_6
U très appauvri
Fabrication des combustibles
Fabrication des combustibles
Fabrication des combustibles
^{233}U
(U, Pu) O_2
Thorium
UO_2
U appauvri
Réacteur thermique à U enrichi
Coeur
Manteau
Réacteur rapide surgénérateur
Réacteur thermique à U naturel
Pu
Combustibles irradiés
Traitement du manteau
Traitement du manteau thorium
Combustibles irradiés
Pu
U à retraiter
U appauvri
Retraitements
Conditionnement et stockage des déchets

Figure 1.

voies d'utilisation civiles de l'énergie nucléaire, explique facilement cette situation (Figure 1). Des opérations chimiques importantes interviennent à tous les stades : traitement de la matière première à la mine même, où le minerai est concentré, préparation des uranates, préparation des fluorures, enrichissement de l'uranium, traitement des combustibles usés, traitement et stockage des déchets.

Une autre conférence traite des étapes les plus importantes industriellement dans le cycle de combustible nucléaire : l'enrichissement de l'uranium, le retraitement des combustibles usés. Leur mise en œuvre nécessite des installations si considérables que, en Europe, les moyens nécessaires à la construction de l'usine de diffusion gazeuse du Tricastin : Eurodiff, n'ont pu être réunis que par une coopération internationale.

Malgré cela, il est trop méconnu que, pour la domestication de l'énergie nucléaire, le fonctionnement des ateliers du cycle de combustible a autant d'importance que celui des réacteurs nucléaires eux-mêmes. De plus, lorsqu'il est fait référence dans la presse aux usines de retraitement, comme La Hague, le conditionnement des déchets de fission est plus fréquemment évoqué que l'extraction d'un nouveau matériau fissile et la réutilisation de l'uranium non brûlé.

On parle encore beaucoup moins fréquemment des opérations chimiques liées au fonctionnement des réacteurs qui sont certes moins spectaculaires par leur objet et les installations qu'elles nécessitent. Mais, les problèmes à résoudre sont pourtant fondamentaux pour l'utilisation de l'énergie nucléaire. Je vais tâcher de les évoquer, mais je rappellerai d'abord, un peu en marge,, quelques-unes des applications extrêmement variées des sous-produits du fonctionnement des réacteurs de recherche que sont les radioéléments artificiels.

J'en viendrai ensuite, seulement, au rôle du chimiste dans l'exploitation des circuits de fluides des réacteurs nucléaires des différentes filières et même dans la conception de certaines d'entre elles.

Les exemples cités, complétés par des indications sur la place qu'il faut donner, et qui est grande, à la résolution des problèmes chimiques dans l'étude de réacteurs qui mettraient en œuvre la fusion nucléaire, seront utilisés pour justifier des propositions de sujets de réflexion pour le débat sur un enseignement de la chimie tenant compte de la place de celle-ci dans les industries nucléaires.

Utilisation des isotopes et du rayonnement

Les utilisations des isotopes radioactifs les plus répandues ne sont pas toujours celles connues du grand public.
Sait-on que des dizaines de milliers de détecteurs de fumée, servant d'avertisseurs précoces d'incendie, sont en service dans les lieux publics en France seule ?

Les applications les plus nombreuses sont du domaine biomédical où les isotopes peuvent servir, soit à mesurer des volumes ou « espaces », des métabolismes et des débits lorsqu'on les emploie comme traceurs, soit à des visualisations ou scintigraphies, ou à des traitements thérapeutiques lorsque, comme l'iode, ils viennent se fixer dans un organe à soigner. Les deux dernières applications reposent sur l'utilisation des rayonnements émis; l'isotope utilisé doit donc être radioactif. En revanche, lorsqu'il s'agit, comme dans le premier cas, de mesures faites à l'aide d'indicateurs, les isotopes utilisés peuvent indifféremment être non radioactifs (stables) ou radioactifs, pourvu que l'on dispose des instruments de mesure nécessaires. Dans le cas de mise au point de diagnostics médicaux, la préférence pourra être donnée à ces isotopes stables pour limiter les doses délivrées.

Mais, en biologie ou en médecine l'emploi d'isotopes n'est possible que s'ils sont introduits dans les molécules ayant le métabolisme voulu. Il faut donc préparer ces « molécules marquées ».

Leur synthèse est très particulière, car on cherche non seulement à introduire un atome de carbone 14 ou de deutérium, par exemple, dans les édifices moléculaires, mais à le faire à un emplacement précis soit d'une chaîne ou d'un cycle. Des méthodes, parmi lesquelles la R.M.N., permettent de contrôler sans ambiguïté les positions occupées par les isotopes tant dans les molécules initiales que dans leurs produits de dégradation. Par ces synthèses, les organiciens rendent à la recherche des services parmi lesquels je citerai, en biologie, la découverte du mécanisme du cycle du carbone, (où l'on sait le rôle qu'ont joué les molécules marquées au carbone 14) et une application médicale récente : pour étudier des maladies du foie, on peut suivre le catabolisme de médicaments tels que le pyramidon par dosage du ^{13}C, ou du ^{14}C, dans les gaz respiratoires. Une telle étude repose sur la synthèse du pyramidon marqué et sur le dosage du carbone isotopique dans le CO_2 exposé. On a montré que la vitesse d'apparition du traceur peut servir de moyen diagnostic pour certaines affections.

Il est facile de voir qu'une grande proportion des applications des isotopes citées dans le tableau 1 ne sont possibles qu'en faisant appel à la chimie comme auxiliaire.

La chimie et les réacteurs nucléaires

Les réacteurs à eau lourde ou ordinaire

Allons maintenant au cœur de l'utilisation de l'énergie nucléaire : la production d'électricité. Ayant séparé les isotopes de l'uranium pour les métallurgistes qui fabriquent les combustibles, préparé l'eau lourde ou le graphite des modérateurs, le chimiste reste-t-il en dehors des centrales nucléaires, en attendant d'en retraiter les combustibles ?

Filière par filière, je vais tenter de répondre à cette question.

Les réacteurs modérés à l'eau lourde ont été les premiers construits en France et ils servent encore de réacteurs de recherche, comme ORPHEE qui va être mis prochainement en service à Saclay.

La photo 1 illustre de façon sensible la justesse de l'adjectif « lourd » appliqué à cette variété d'eau. On pourrait penser qu'à cette propriété et aux problèmes de maintien du titre isotopique près, les problèmes seraient les mêmes dans les réacteurs à eau lourde de puissance et à eau ordinaire pressurisée : les PWR construits en France.

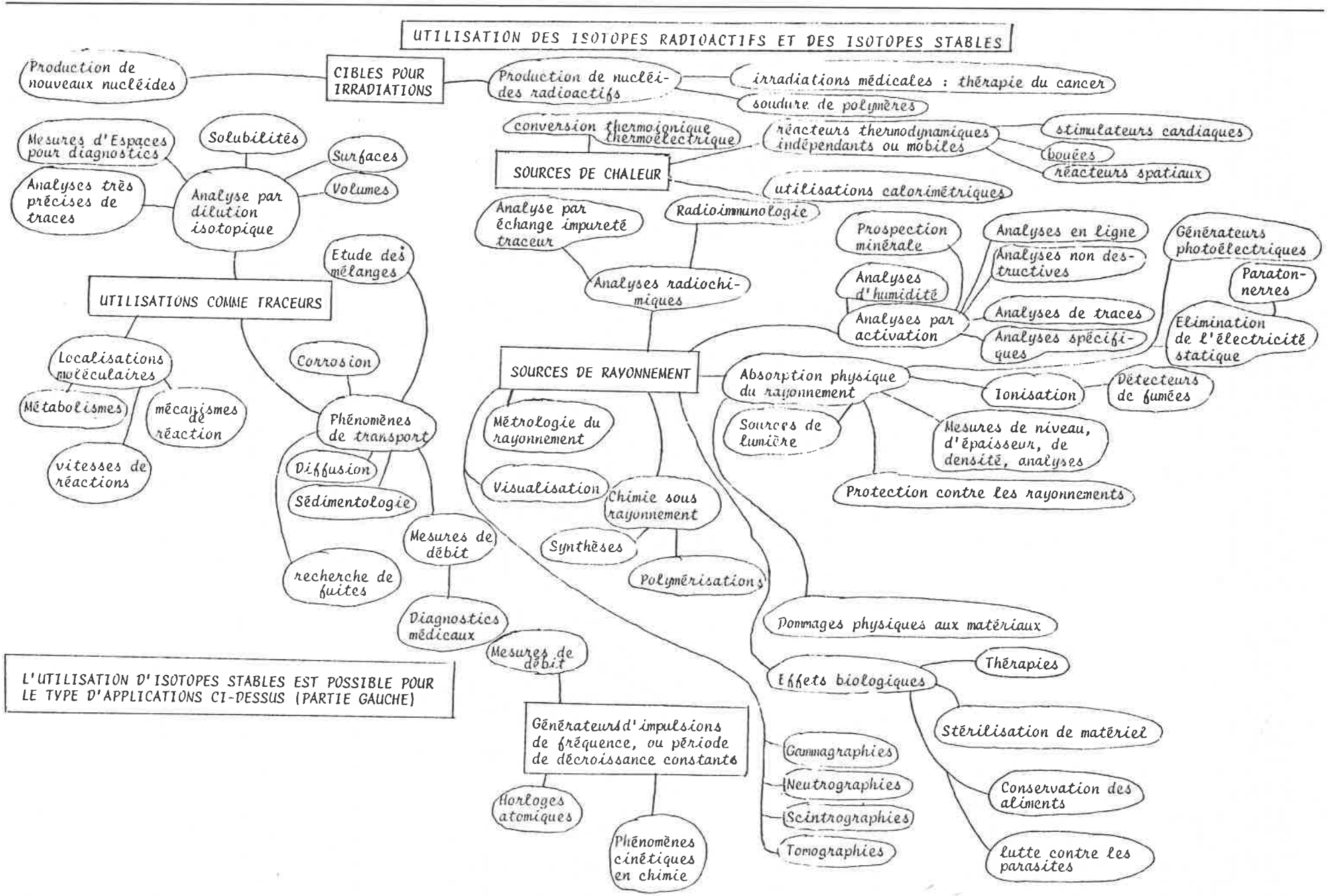
Ce n'est pas le cas. Dans les premiers réacteurs *, l'eau lourde dont la quantité reste constante au cours de la vie du réacteur est utilisée, dans deux régions distinctes, à la modération et au refroidissement. Dans la seconde région la préoccupation majeure est le maintien d'une pureté suffisante chimique, isotopique, et d'un pH convenable pour limiter la corrosion.

* *Pour la filière « CANDU » au moins.*

Moyennant quoi l'effet du rayonnement qui peut conduire à une radiolyse entraînant une perte de deutérium est très limité. Dans la première région, une faible quantité de « poison soluble » absorbeur de neutrons, dont l'élimination augmente la radioactivité suffit à compenser « l'effet xénon ».

Dans les réacteurs à eau légère, on utilise de l'uranium enrichi et, par conséquent, la matière fissile est plus concentrée et le taux de conversion en plutonium est plus faible. Il faut donc compenser la perte de réactivité des combustibles au cours de leur vie. Pour cela, on ajoute environ deux mille ppm de bore sous forme d'acide borique à l'eau qui passe dans le cœur dite « eau du circuit primaire » et ceci en début de cycle, et on le retire peu à peu. On contrôle le pH, pour limiter la corrosion, par l'addition de quelques ppm de lithine préparée à partir

Tableau 1. Utilisation des isotopes radioactifs et des isotopes stables.



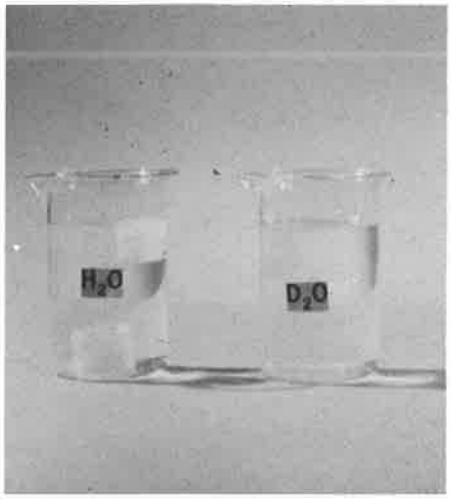


Photo 1.
Becher plein d'eau ordinaire :
• en surface glaçon d'eau ordinaire
• au fond glaçon d'eau lourde
A droite, becher plein d'eau lourde ayant servi à préparer le deuxième glaçon.

de l'isotope 7 du lithium presque pur. La radiolyse est prévenue en utilisant une atmosphère d'hydrogène dans le pressuriseur, ce qui en maintient une quantité suffisante en solution pour faire rétrograder les réactions de dissociation.

On utilise des résines échangeuses d'ions pour provoquer les faibles modifications de teneur en acide borique. On en utilise aussi pour épurer l'eau des produits de corrosion solubles. Ces résines, exigence inhabituelle, ne doivent pas relâcher elles-mêmes d'impuretés activables ou capturantes. On doit ainsi prohiber le chlore de leur fabrication (dans les réacteurs à eau lourde, elles devraient de plus être deutériées). L'élimination des produits de corrosion est nécessaire, parce que leur activation dans le cœur des réacteurs est très intense et leur accumulation rendrait difficile l'accès, pour les entretenir, à certaines parties des circuits d'eau. On étudie la possibilité d'ajouter aux épurateurs habituels, qui fonctionnent sur des dérivations froides du circuit, des dispositifs fonctionnant à chaud (pour ne perdre aucune calorie) et permettre d'éliminer les matières en suspension.

Dans un réacteur en fonctionnement normal on essaye d'éviter les variations brusques de pH, au moment de l'introduction d'acide borique, ou de son élimination, parce qu'elles provoquent une migration des dépôts de produits de corrosion insolubles vers des régions non prévues par les codes de calcul.

Les chimistes s'efforcent de prévenir la corrosion que la présence de rayonnement favorise, mais les additions (hydrazine, morpholine) ne peuvent pas toujours être faites efficacement à cause précisément de la destruction rapide de certaines molécules dans les conditions du cœur.

Tout aussi importants à éviter, bien qu'ils soient « inactifs », sont les dépôts de produits de corrosion dans le circuit d'eau « secondaire », qui est celui qui ne traverse pas le cœur, mais passe dans la turbine. La chaleur extraite du cœur par l'eau du circuit primaire est transférée au secondaire dans le générateur de vapeur (G.V.). La corrosion du côté secondaire se traduit entre autres par l'apparition redoutée du « denting » (indentation des tubes) du G.V.

On comprend, d'après ce qui précède, que certaines concentrations de polluants (fluor, sodium) soient mesurées en poussant les limites de détection respectivement au-dessous du ppm et du ppb, ce qui est inhabituel pour ces éléments et nécessite l'étude et la mise au point de méthodes analytiques spéciales.

De plus, pour prévoir l'évolution de la corrosion, les données de la littérature (les bases de données suivant l'expression anglo-saxonne adoptée généralement) étaient très insuffisantes il y a encore quelques années et l'on doit y suppléer.

Par exemple, au-dessus de 150 °C, même pour des oxydes métalliques courants comme les magnétites ou les ferrites, ou des molécules comme le sulfate de magnésium, aucune mesure n'avait encore été effectuée il y a une dizaine d'années. Et cela est vrai aussi des oxydes de nickel, de cobalt et de la magnésie.

A la connaissance des effets chimiques nécessaire, en fonctionnement normal s'ajoute la prévision indispensable des réactions possibles en cas d'incident.

L'affaire de Three Mile Island l'a bien montré, puisque l'une des principales difficultés y a été la formation de la fameuse « bulle » d'hydrogène par réaction de l'eau d'arrosage sur le métal chaud du cœur. Cette bulle bloquait la circulation du fluide de refroidissement et risquait de provoquer des explosions. Des dispositifs catalytiques, analogues aux « pots » usuels de recombinaison de l'hydrogène radiolytique, ont du finalement être utilisés pour oxyder la fraction de ce gaz qui s'est échappée.

Il faut remarquer que depuis longtemps on recommandait qu'en cas d'incident nécessitant l'arrosage du cœur du réacteur, l'eau utilisée contienne des additifs limitant les possibilités de radiolyse dues à la radioactivité résiduelle des barreaux, à l'arrêt. Mais il est moins facile de lutter contre la réduction directe de l'eau par ces barreaux combustibles lorsqu'ils ont chauffé et fondu à la suite d'un arrêt du refroidissement.

Les réacteurs des autres filières

L'eau est un liquide particulièrement complexe, les filières de réacteurs nucléaires qui utilisent d'autres caloporteurs et modérateurs posent-elles moins de problèmes chimiques ?

Les plus anciens réacteurs de puissance en service sont du **type gaz-graphite.**

Du gaz carbonique y refroidit des éléments combustibles en uranium à la teneur isotopique naturelle. Les neutrons sont ralentis par des blocs de graphite. Cette filière a révélé un cas tout à fait spécifique de corrosion sous rayonnement : l'attaque du graphite par le gaz carbonique excité par le rayonnement.

Cette excitation permet (seule) la réduction du CO_2 par le graphite en donnant deux molécules d'oxyde de carbone.
C'est à la suite d'expériences conduites dans des « boucles en pile » qu'on a d'abord déterminé que l'excitation du CO_2, et non du graphite, était responsable de la réaction, puis qu'une méthode a pu être trouvée pour l'inhiber : l'injection de quelques ppm de méthane dans le CO_2.
Parallèlement, des installations catalytiques de recombinaison de l'oxyde de carbone avec l'oxygène sont utilisées.

En France, ces études ont eu des retombées inattendues : la mise au point de pots de catalyse pour le traitement des gaz d'échappement des voitures automobiles.

La filière la plus « avancée » est celle des **réacteurs rapides ou surgénérateurs.** Elle présente aussi des problèmes chimiques spécifiques. Le refroidisseur étant le sodium, un tel milieu impose d'abord la mise au point de méthodes de dosage des impuretés susceptibles de susciter la corrosion des matériaux de structure. Parmi ceux-ci le carbone pose un problème difficile.
Mais l'étude de la carburation des gaines par le carbone transporté par le sodium a fait aussi découvrir une source inattendue de cet élément : le combustible lui-même, qui est un oxyde mixte d'uranium et de plutonium.
Sous l'effet des neutrons rapides l'oxygène subit des réactions n, α et forme ainsi du carbone 13 à partir de l'isotope 16 et le carbone formé réduit les oxydes présents, ce qu'il ne peut faire parce que c'est un atome « chaud ». On sait en effet que les oxydes d'uranium ne peuvent pas être réduits par le carbone et qu'industriellement on utilise le fluor pour déplacer l'oxygène et éliminer ensuite celui-ci par le calcium ou le magnésium.
Ensuite, l'oxyde de carbone migre du centre du combustible plus chaud vers la gaine plus froide, à laquelle il se combine.
C'est le dégazage de morceaux de gaine et l'extraction d'oxyde de carbone titrant jusqu'à 30 % de ^{13}C, au lieu de 1 % dans le carbone naturel, qui a fait découvrir ce phénomène.

Une fois bien éprouvées les dispositions prises pour faire face aux difficultés citées, les problèmes chimiques auront-ils été résolus pour les **réacteurs de l'avenir** ?
La réponse est évidemmant non, parce que toute méthode est toujours perfectible et surtout parce que, à des dates impossibles à

préciser, pourraient entrer en ligne des filières nouvelles : filières à haute température, filières à combustibles liquides, soit dans une version homogène, soit sous une version à sels fondus.
Pour cette dernière filière, on introduit dans le cœur des sels (fluorures du lithium, du beryllium et de l'uranium) à l'état liquide et on les traite à la sortie pour en extraire les produits de fission et recycler l'uranium et le plutonium produits.

Les difficultés de réalisation des éléments combustibles solides et de leur gaine ainsi que certains des problèmes des usines de retraitement, disparaissent avec l'emploi de cette filière. Chaque parc de réacteurs aurait sa propre installation de purification et de rechargement en matière fissile des sels fondus. Leur utilisation permet aussi bien la réalisation de réacteurs « rapides » que thermiques, mais avec d'autres compositions.

La version « homogène » ne mériterait probablement plus d'être mentionnée, étant donné le peu de chances qu'elle semble avoir aujourd'hui de revivre, si ce n'est que, comme la précédente, il s'agit d'une filière de chimiste conçue initialement par A. Weinberg.

On se contentera de voir, sur la figure 2, combien les schémas du circuit de fluide

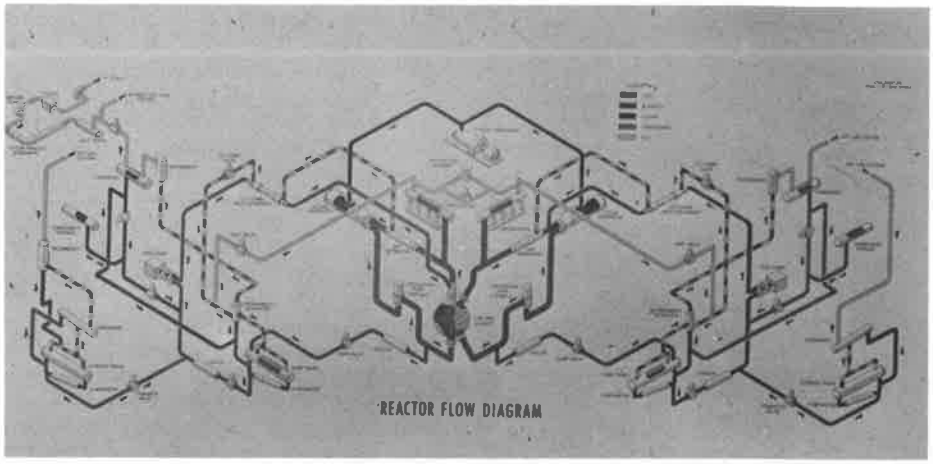


Figure 2. Schéma général de circulation du « combustible » dans un réacteur homogène.

d'un tel réacteur rappellent plutôt ceux d'une raffinerie que ceux d'une centrale nucléaire classique.

Quant à la **filière haute température,** sans entrer dans ses problèmes propres, signalons que la seule possibilité qu'elle voit le jour a suscité des études de génie chimique nouvelles : d'une part, celle de la fabrication d'hydrogène par cycles thermochimiques, d'autre part, celle de méthodes de transport d'énergie, ouvrant aux chimistes un domaine nouveau pour eux. Les études de thermochimie ont, sans pourtant réellement déboucher, donné lieu à de très nombreux travaux.

Le système dit ADAM et ÈVE *, expérimenté en Allemagne, consiste à induire par la chaleur produite dans le réacteur AVR la réaction de dissociation du méthane, à transporter les gaz produits et à utiliser la chaleur de la réaction de recombinaison là où on a besoin de consommer l'énergie.

Les problèmes de la fusion contrôlée

Mais voyons encore plus loin, et supposons que la fusion contrôlée devienne une source utilisable d'énergie. Elle a l'intérêt de faire appel à des sources de combustibles pratiquement inépuisables.

L'un de ses avantages corrélatifs souvent cités est l'absence de formation de produits de fission. Elle ne demande ni l'enrichissement de l'uranium, ni une production importante d'eau lourde, ni de résoudre de difficiles problèmes de retraitement.
Mais, dans un premier stade au moins, les problèmes chimiques n'en sont pas moins ardus : ils sont liés à la production de tritium. En effet, la première réaction de fusion utilisée sera certainement la réaction :

$$^{2}_{1}D + ^{3}_{1}T \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n + 17{,}6\ MeV \quad (I)$$

Les neutrons emportent une énergie de 14 MeV, les α de 3,6 MeV. Quel que soit le dispositif utilisé, confinement magnétique, ou confinement inertiel (lasers), il faudra produire le tritium *au fur et à mesure de sa consommation* à l'aide des neutrons de la réaction I une fois que « thermalisés » ils auront cédé leur énergie au fluide caloporteur.
En effet, on utilise pour produire le tritium la réaction

$$^{1}_{0}n + ^{6}_{3}Li \rightarrow ^{3}_{1}T + ^{4}_{2}He \quad (II)$$

et un bilan simple montre, que pour produire le tritium nécessaire à alimenter un réacteur de fusion, il faudrait des sources d'énergie de fission 15 à 20 fois plus puissantes que lui..., ce qui ôterait évidemment tout intérêt à la fusion.

Considérons, pour fixer les idées, le schéma en coupe d'un réacteur de fusion à confinement magnétique capable de produire 1 000 MWe, donc environ 3 000 MW_{th} (figure 3).
La consommation de tritium est d'environ 0,15 g par MW_{th}/jour. Ce réacteur en « brûle » donc 450 g par jour.
Ils doivent être produits dans la couverture qui sera nécessairement soit du lithium pur, soit un composé de lithium. Sa conception et ultérieurement le traitement à lui faire subir pour en extraire le tritium soulèvent un grand nombre de problèmes.

Le premier est que la couverture doit produire plus d'un noyau de tritium par neutron absorbé. En effet, d'après la réaction I, la combustion d'un tritium ne produit qu'un seul neutron. Donc, compte tenu des pertes inévitables (géométrie, absorptions parasites), c'est moins de 1 neutron qui est disponible pour la régénération du combustible. On doit compter, soit sur des réactions avec des neutrons rapides qui produisent un peu de tritium sans consommer les neutrons, soit sur l'utilisation de véritables multiplicateurs de neutrons, c'est-à-dire d'éléments subissant des réactions *n*, 2*n* et que l'on rajoute au lithium. De façon favorable le lithium 7 présent dans l'élément naturel, à 87 % environ, subit une réaction (n_1 n^1 α T) du premier type. Un bon multiplicateur de neutrons est le plomb.

Quelle que soit la nature de la couverture, son poids sera de quelques centaines de tonnes au moins. La production journalière de tritium y représentera une concentration massique de l'ordre du ppm et c'est autour de cette concentration que l'on envisage de l'extraire, pour plusieurs raisons :
a) laisser le tritium s'accumuler pour faciliter sa récupération nécessiterait de constituer (comment ?) les stocks correspondants de démarrage.
b) une concentration plus élevée pourrait entraîner une diffusion appréciable dans les matériaux de structure, puis vers l'extérieur, rendant difficile le maintien des activités en tritium de l'atmosphère autour du réacteur, aux valeurs imposées par les normes de sécurité (10^{-5} Ci par m^3, soit 10^{-9} g pour 1 200 g d'air). A cause des faibles teneurs de travail qui imposent aussi la nécessité d'extraire quasi totalement les gaz, les opérations de traitement de la couverture ne seront pas faciles et les installations correspondantes seront importantes. En effet, si la couverture est en lithium métallique, la formation d'hydrure (LiT) stable oblige pour l'extraction du tritium à

* *L'actualité chimique, 1978,* **10** *(Décembre), 18 et 1979,* **7** *(Septembre), 27.*

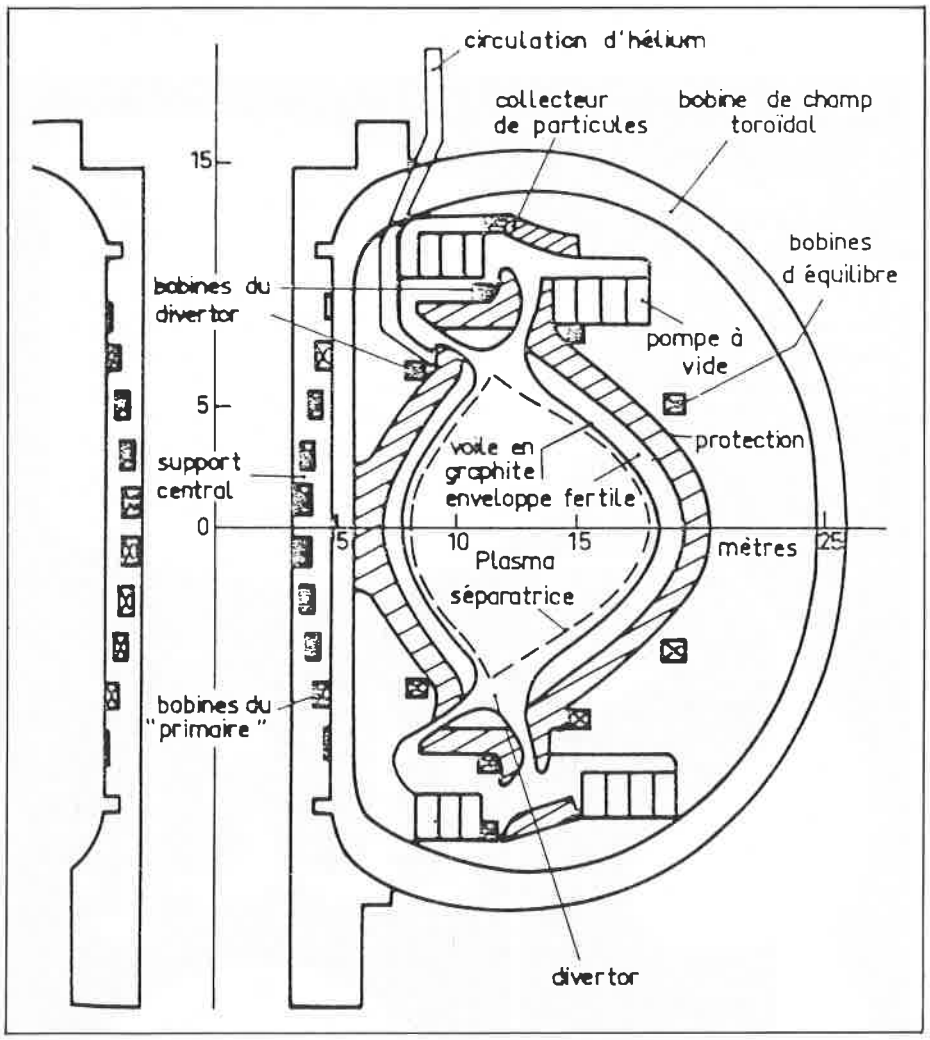


Figure 3. Coupe d'un réacteur de fusion à confinement magnétique.

choisir d'autres méthodes que le dégazage par pompage ou balayage de gaz. On envisage l'électrolyse, l'extraction par solvant (sels fondus...). Un circuit complexe de traitement de la couverture devra être étudié et construit. S'il s'agit d'un composé solide, seule l'étude cas par cas permettra de connaître, en fonction de sa texture, aussi bien que de sa composition, à quelle température et dans quelles conditions (pompage, balayage de gaz et à quelle vitesse spatiale) le tritium pourra être extrait. Des considérations préliminaires montrent que si un balayage de gaz est envisagé, ce sont des milliers de m^3/seconde qu'il faut employer pour des masses de l'ordre de celles de la couverture.

Pour préciser de tels chiffres, beaucoup de données de base doivent être connues, telles que solubilité du tritium dans les composés lithiés, constantes de Sievert correspondantes, pour pouvoir faire des projets détaillés.

Sans entrer plus avant dans la discussion des problèmes liés à la fusion, car il faudrait alors inclure les purifications, les rééquilibrages isotopiques, etc. il faut ajouter que l'on peut prévoir aussi que des réactions secondaires d'origine nucléaire, analogues à celles que nous avons examinées dans le cas des réacteurs à neutrons rapides, pourront se produire.

Enfin, malgré l'absence de produits de fission et de transuraniens, la production d'énergie utilisant les réactions de fusion s'accompagnera de la formation, dans les structures, d'éléments radioactifs dus à l'activation neutronique. Bien que beaucoup moins importants, les problèmes de stockage de déchets solliciteront donc encore l'attention des chimistes, qui devront continuer à étudier la stabilité vis-à-vis des attaques par l'eau, notamment à des températures et des environnements divers, des containers de stockage et la tenue des matériaux d'enrobage eux-mêmes : verres, bétons, ou autres... Mais, en l'absence de transuraniens émetteurs α à vie longue, il sera peut-être possible de réduire les durées de garantie de bon comportement des enceintes de confinement.

Conséquences pour l'enseignement de la chimie

Cette revue longue, mais encore superficielle, du rôle du chimiste autour des réacteurs conduit à quelques suggestions pour l'enseignement de la chimie.

L'une d'elles, et peut-être la plus importante, est qu'il est nécessaire qu'un peu de chimie au moins soit enseignée dans *toutes* les écoles d'ingénieurs et figure dans tous les cursus scientifiques. Il faut examiner avec soin comment cela pourrait être fait. Mais trois idées devraient avoir pénétré tout étudiant en sciences, et tout élève ingénieur :

- la première est que seule la connaissance détaillée de la composition chimique et de la texture de systèmes peut permettre de maîtriser leur comportement dans des gammes étendues de conditions de fonctionnement.
- la seconde, est qu'un système chimique a des possibilités d'évolutions que la thermodynamique (classique ou statistique) peut permettre de prévoir, mais uniquement si la nature et les teneurs des corps de départ et des produits finals sont connus, ainsi que leurs fonctions thermodynamiques.
- enfin, la troisième idée est que l'expérience est indispensable pour déterminer si une réaction permise a effectivement lieu, c'est-à-dire se produit avec une *cinétique* appréciable.

Étudier la nature exacte des systèmes et expérimenter pour prévoir leur évolution apparaissent alors sous leur vrai jour, c'est-à-dire comme une nécessité liée à la nature des choses et non comme le besoin d'effectuer la vérification, en dernière minute éventuellement, de comportements qui auraient « dû » pouvoir être prédits *a priori*.

Pour la formation des chimistes eux-mêmes, appelés à travailler autour des réacteurs, ces trois idées ne sont pas moins importantes, et la pratique du laboratoire leur en facilite la compréhension et les en imprègne presque inconsciemment *. Ils auront besoin bien sûr de connaître spécialement la technologie des réacteurs, les impératifs des opérations de la mise en route et d'arrêt, les radioactivités résiduelles des barreaux, et la chimie des produits de fission. Mais il faut aussi les préparer à avoir à déterminer ou à vérifier un grand nombre de données de base que l'on pourrait à tort espérer trouver, en 1980, dans les tables et les recueils chimiques.

C'est la leçon qu'il faut tirer du fait qu'un

** La pratique de la chimie analytique, recommandée par M. Robin au cours de la discussion, est certainement très formatrice à cet égard. On y apprend à contrôler les quantités mises en œuvre, les vitesses de mélange, les températures, et à comprendre le pourquoi.*

grand nombre de valeurs, de solubilités par exemple, nécessaires à la chimie des réacteurs nucléaires n'avaient jamais été déterminées, ou l'étaient avec une précision insuffisante.

Or, une expérience analogue peut être tirée des études sur le dessalement de l'eau de mer, au cours desquelles il a fallu mesurer la solubilité des sulfates de calcium dans l'eau au-dessus de 100 °C. Une troisième expérience analogue a été faite au cours de l'étude des cycles thermochimiques pour la préparation de l'hydrogène : la précision des données enthalpiques et entropiques ne permettait pas de prédire si la réaction de décomposition de tel carbonate, avec oxyde de carbone, était possible ou non.

Il y a donc, en particulier pour les besoins de la chimie appliquée au nucléaire, une mine de sujets de recherche de base à entreprendre dont les résultats permettraient d'alimenter des banques de données en valeurs précises. Une des conséquences en serait de pouvoir utiliser les ressources des ordinateurs pour écrire de nouvelles réactions théoriquement possibles. L'expérience devrait alors montrer si elles ont effectivement lieu ou non.

L'enseignement au niveau des troisièmes cycles pourrait peut-être se pencher théoriquement et expérimentalement sur les problèmes des réacteurs nucléaires de tous types.

Conclusion

J'espère que cet exposé pourra aider à réfléchir aux moyens de donner un sentiment général des problèmes chimiques à tous les ingénieurs du nucléaire, ce qui est aussi important que de donner une connaissance spécifique des problèmes du nucléaire aux ingénieurs chimistes appelés à collaborer avec eux.