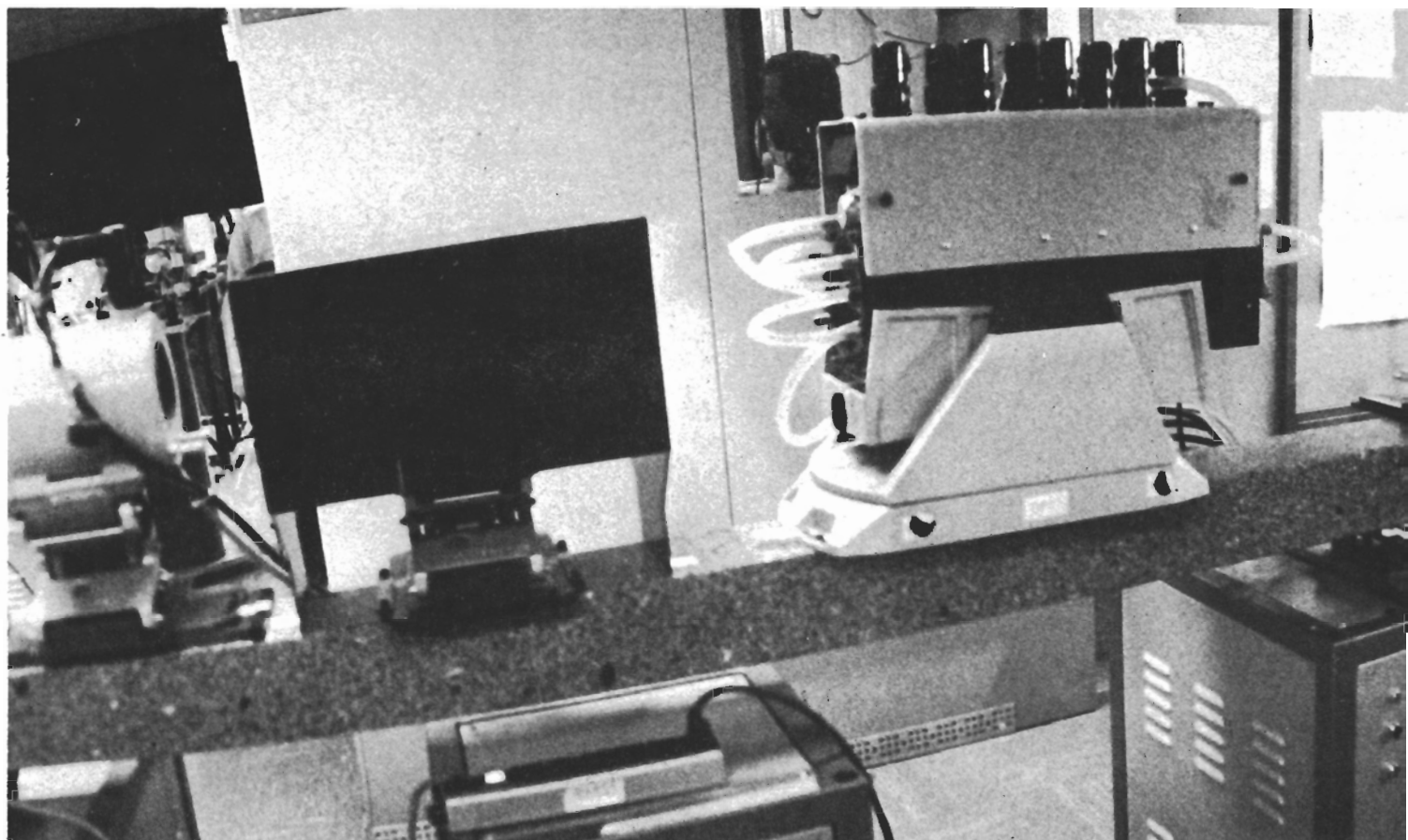




il n'y aura pas de "fusion propre"

Fabien Gruhier

Pour de nombreux spécialistes, la cause est entendue : l'avenir énergétique de l'humanité sera assuré par la fusion des atomes légers. Le charbon et le pétrole appartiennent au passé. La fission de l'uranium mise en œuvre dans les centrales nucléaires actuelles n'aura qu'un temps : les réserves d'uranium sont limitées, même si l'on tient compte des réacteurs surrégénérateurs capables d'utiliser l'uranium 238 non fissile après sa conversion en plutonium. La fission pose d'ailleurs de tels problèmes de sécurité et de pollution radioactive que nul ne la regrettera le jour où une solution plus élégante sera disponible. L'énergie solaire ne semble guère pouvoir jouer beaucoup plus qu'un rôle marginal. Heureusement, il y a la fusion thermonucléaire, qui consiste précisément à créer de toutes pièces des soleils miniatures. C'est en effet grâce à la fusion de l'hydrogène que le soleil peut se permettre de répandre des gigawatts à profusion. Les énergies fossiles, hydrauliques, éolienne ou végétale que nous consommons en tirent plus ou moins directement leur origine.

Il paraît logique de s'attacher à mettre en œuvre dans des centrales terrestres un processus aussi fondamental. La fusion dissiperait à tout jamais le spectre de la pénurie : en puisant son combustible dans l'immensité des océans, l'humanité pourrait tranquillement renouer avec la perspective vertigineuse d'une croissance exponentielle. Sans troubles de conscience : les réactions de fusion, au contraire des réactions de fissions, ne produisent, dit-on, aucun résidu, aucune pollution radioactive. Comme elles

se déroulent à des températures extraordinairement élevées, elles minimiseraient même paradoxalement la pollution thermique - dans l'hypothèse certes très pessimiste où rien de mieux ne serait trouvé que les classiques turbines à vapeur pour opérer la conversion en électricité : le rendement de cette conversion s'améliore à mesure que la « source chaude » devient plus chaude. Bref, la fusion, inépuisable et propre, ressemblerait fort à une énergie idéale.

Neutrons et tritium

La réalité est moins souriante. Alors même que plusieurs décennies nous séparent encore du premier réacteur à fusion, les chercheurs ont déjà mis en évidence de sérieuses raisons de déchanter. Certes, la réaction en vertu de laquelle deux atomes d'hydrogène s'unissent pour former un atome d'hélium avec libération d'énergie ne crée en elle-même aucune « cendre radioactive ». Elle émet toutefois un neutron animé d'une très grande vitesse. Ce neutron rapide est même le principal véhicule de l'énergie libérée : il en emporte 80%. Le reste (20%) apparaît également sous forme cinétique : c'est la vitesse communiquée au noyau d'hélium. Dans une réaction de fission, qui libère elle aussi de l'énergie cinétique (donc thermique, puisque la chaleur traduit la vitesse des particules de matière), la proportion est inverse : les neutrons n'emportent que 20% de l'énergie, et les fragments de fission évacuent le reste. Entre les deux se situe le surrégénérateur. Il est frappant de constater que la succession : réacteur de fis-



**Le miracle énergétique
n'aura pas lieu. La
fusion de l'hydrogène doit
aujourd'hui descendre
de son piédestal :
elle sera « sale »
et même « très sale ».**

sion, surrégénérateur, réacteur de fusion, correspond à un renforcement du rôle des neutrons, de plus en plus importants et rapides. On peut même voir dans les neutrons la véritable richesse énergétique de l'avenir.

Et la source de multiples problèmes. En effet, les neutrons très énergétiques interagissent avec la matière. De nombreux travaux s'efforcent actuellement de préciser les modifications induites par de tels « arrosages » neutroniques : les matériaux se détériorent et deviennent en même temps radioactifs par activation. Les atomes bombardés se transforment, dans une certaine proportion, en radio-éléments de période éventuellement très longue. Il s'ensuit que les organes constitutifs d'un hypothétique réacteur à fusion devraient être remplacés plus ou moins fréquemment. S'ils s'avéraient assez résistants sur le plan mécanique pour durer aussi longtemps que le réacteur, ils deviendraient ensuite des résidus indirects très encombrants et dangereux. Ce pourrait être là un écueil plus redoutable encore que les déchets des actuelles centrales de fission, même si ces dernières posent également le problème de savoir ce qu'on en fera au moment de leur « mise à la retraite ».

A cela s'ajoute une seconde interrogation d'ordre écologique. Elle est liée à la nature du combustible d'un réacteur de fusion : la réaction la plus facile à mettre en œuvre est l'union d'un atome de deutérium (hydrogène « lourd », stable et abondant dans la nature) avec un atome de tritium (hydrogène « hyperlourd », inexistant à l'état naturel et radioactif avec une période de 12 ans). A

Alignement de faisceaux dans les laboratoires d'une société privée américaine - la K.M.S. Fusion Incorporated — qui poursuit des recherches sur la fusion selon la filière des microexplosions « allumées » par laser.

n'en pas douter, ce sera la réaction utilisée d'abord. Les premiers réacteurs obligeront donc à confiner de notables quantités de tritium : si une centrale à fission de 1 000 mégawatts ne donne que quelques grammes par an de ce gaz une centrale à fusion d'égale puissance en contiendra à tout instant environ 1 kg et la consommation annuelle se chiffrera en tonnes. Or le tritium partage avec l'hydrogène ordinaire et le deutérium la particularité - redoutable étant donné sa radioactivité - de diffuser très facilement à travers les parois dans lesquelles on s'efforce de le contenir : des récipients réellement étanches sont très difficiles à réaliser.

Dans le réacteur thermonucléaire - selon l'idée que l'on s'en fait aujourd'hui - le tritium sera fabriqué sur place, par la collision de certains des neutrons produits avec une couverture de lithium (lithium + neutron $\longrightarrow$ hélium + tritium). Le bilan des réactions en jeu fait apparaître une sorte de facteur de surrégénération : il se formera davantage de tritium que le réacteur ne pourra en consommer - 1,1 à 1,2 fois plus, estime par exemple M. Denis Breton, du Commissariat à l'énergie atomique (C.E.A.)

Notons que ce taux de surrégénération dépendra de la richesse en lithium de la couverture : on le règlera à volonté, pour produire les quantités de tritium nécessaires au démarrage de nouveaux réacteurs. Mais il faudra ex-

Le Tritium

Isotope « hyperlourd » de l'hydrogène, le tritium possède un noyau composé d'un proton et de deux neutrons. Il est instable et se désintègre en donnant naissance à un atome d'hélium-3 et à un électron. En d'autres termes, l'un de ses neutrons se convertit en proton (positif) par émission d'un électron (négatif). Il s'agit donc de radioactivité bêta, et la période (temps au bout duquel la moitié d'une quantité donnée s'est désintégrée) est de 12,26 années. C'est un gaz, comme l'hydrogène ordinaire. Et il peut remplacer ce dernier dans toutes ses combinaisons, y compris bien entendu la plus répandue : l'eau. A ce titre, il constitue un danger, car il peut ainsi très facilement voyager dans la biosphère, et pénétrer les êtres vivants.

Les réacteurs à eau légère n'en produisent que des traces. Il apparaît par contre en abondance dans les réacteurs à eau lourde, et c'est ainsi qu'on le fabrique actuellement pour les besoins militaires (bombes thermonucléaires) qui constituent son seul débouché. Ceci interdit de connaître les volumes impliqués. On sait toutefois que les techniciens de Marcoule ont l'habitude de manipuler des quantités de tritium atteignant facilement l'ordre de grandeur du kilogramme. Ceci laisse supposer que la technologie de confinement de ce gaz est bien maîtrisée...

Si le tritium devait, dans des centrales thermonucléaires, entreprendre une « carrière » civile, il pourrait être « l'ef-

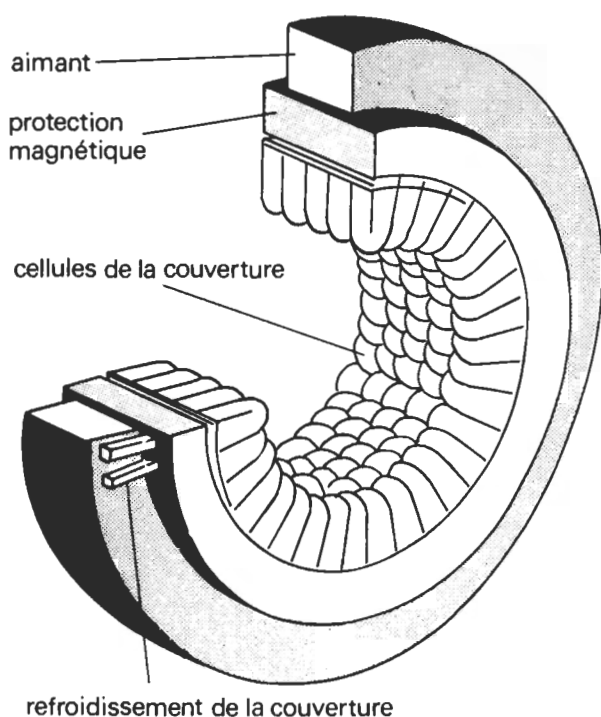
fluent principal d'un réacteur de fusion en fonctionnement normal » reconnaissait J.T.D. Mitchell, de l'Atomic Energy Authority britannique, au cours d'un colloque consacré l'an dernier, sous l'égide de l'Association internationale de l'Energie atomique, aux problèmes que pose la conception d'un réacteur de fusion. Ce participant insistait sur la nécessité de promouvoir trois axes de recherche :

- la définition de normes internationales relatives aux taux acceptables de libération du tritium dans l'environnement ;
- auparavant, on devrait étudier le cheminement du tritium dans les organismes vivants, aussi bien dans l'hypothèse de très faibles fuites que dans celle d'une libération accidentelle massive ;
- concevoir les instruments — ils font actuellement défaut — aptes à mesurer de faibles taux de tritium, de façon à pouvoir, le moment venu, mettre sur pied une surveillance continue des sites de réacteurs.

En attendant, estimait M. Mitchell, il y a lieu d'être très prudent dans toutes les expériences préliminaires impliquant le tritium afin d'éviter un accident qui « porterait atteinte au prestige de la fusion dans l'opinion publique »...

traire le combustible de cette couverture : il s'y trouvera emprisonné dans des « éponges » solides qui exigeront un traitement délicat. On est donc amené à prévoir une véritable usine auxiliaire à proximité immédiate du réacteur de fusion. Ou plutôt deux usines : un réacteur de

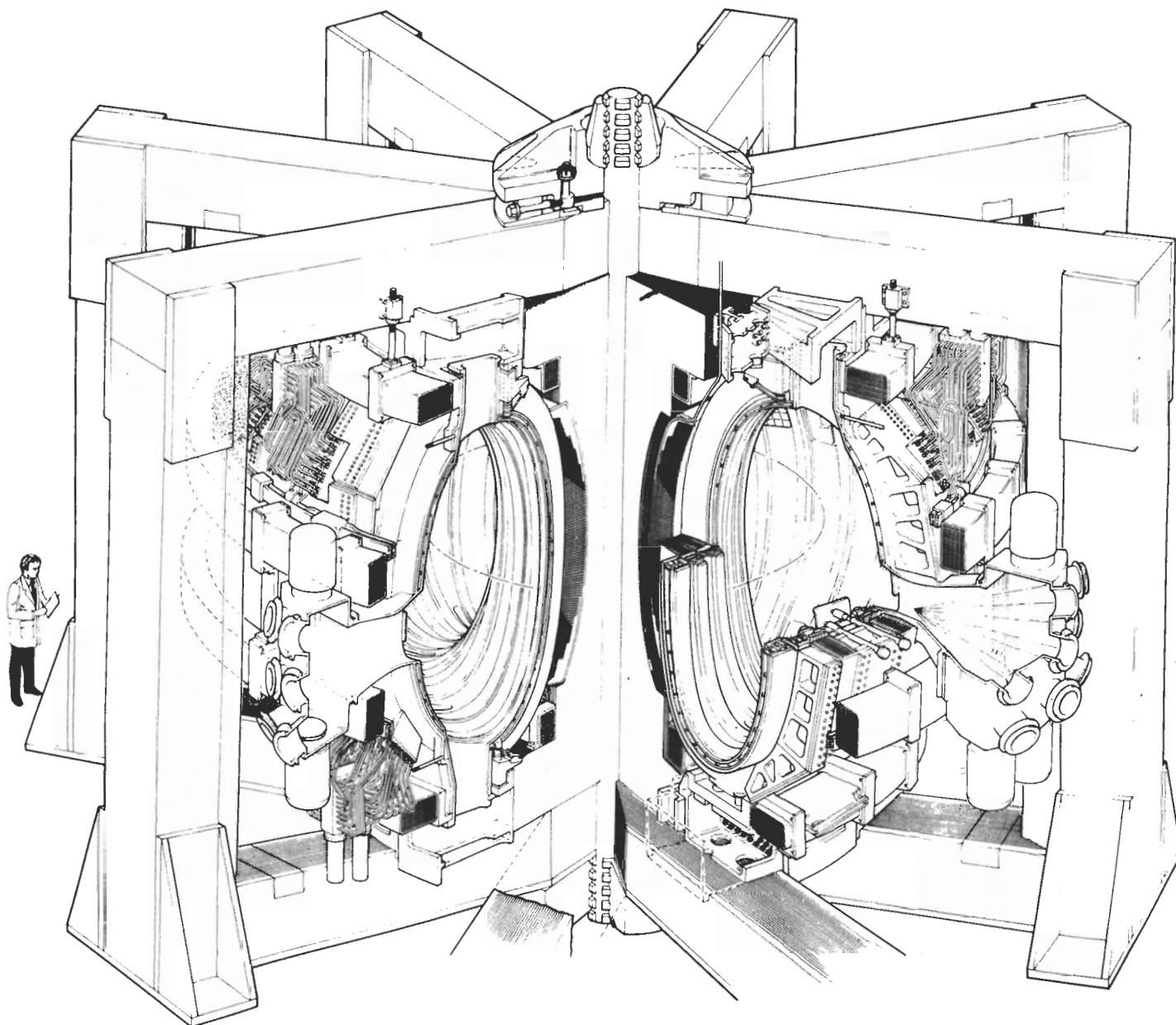
Coupe de la couverture « dopée » au lithium, qui entourerait l'anneau de plasma dans un réacteur de fusion basé sur la filière tokamak : la réalisation de cette paroi multifonctionnelle — il faudrait en extraire aussi bien la chaleur produite que le tritium et peut-être le plutonium créés par les neutrons — soulève de nombreux problèmes technologiques.



fusion ne fonctionnera pas en régime continu, mais sera allumé périodiquement - toutes les 20 minutes environ. Chaque allumage sera précédé d'une vidange et d'une recharge : le mélange gazeux usagé devra subir une liquéfaction - donc une vertigineuse « excursion thermique » partant de 100 millions de degrés pour aboutir à la température de l'hydrogène liquide... Par une distillation de ce liquide, on se débarrassera de l'hélium formé dans la réaction. Puis on récupérera le deutérium et le tritium non brûlés, auxquels on ajoutera du combustible neuf, en prenant soin de réajuster l'équilibre entre les deux isotopes de l'hydrogène qui ne se consomment pas tout à fait au même rythme. Au total, on entrevoit un ensemble d'une effroyable complexité, sans savoir au juste - il s'en faut de beaucoup ! - comment on s'y prendra pour le réaliser. En plus, la surabondance de neutrons disponibles conduira à inclure, dans la couverture de lithium, de l'uranium naturel qui se convertira graduellement en plutonium propre à alimenter les réacteurs de fission (uranium 238 + neutron → plutonium 239).

Pour revenir à la nécessité de confiner le tritium, M. Christian Gourdon, du Département de physique du plasma et de la fusion contrôlée, au C.E.A., affirme que « ce problème sera parfaitement soluble : toute la technologie nécessaire est d'ores et déjà disponible au niveau des équipes spécialisées qui, à Marcoule, fabriquent du tritium requis pour des raisons militaires ».

Deux voies principales sont actuellement explorées pour tenter de maîtriser la fusion thermonucléaire contrôlée : la filière tokamak et la micro-explosion par concentration d'impulsions laser. La première semble pour le moment la plus prometteuse, et le tokamak du C.E.A., à Fontenay-aux-Roses, est aujourd'hui l'appareil expérimental le plus performant de cette catégorie (voir *Sciences et Avenir*, mai 1973). Rappelons qu'il s'agit de contenir le plasma (gaz ionisé porté à une centaine de millions de degrés) dans un récipient immatériel en forme d'anneau, constitué par de puissants champs magnétiques. Le recours à de tels récipients magnétiques vient de ce qu'aucun matériau ne saurait évidemment résister à de telles températures. Une machine européenne - le JET (Joint European Torus) - du type tokamak est à l'étude sous l'égide d'Euratom. Plus puissant que celui de Fontenay-aux-Roses, cet appareil se



Vue en perspective du JET (Joint European Torus), futur tokamak européen.

bornera encore à étudier le confinement magnétique du plasma ; et il ne fera d'abord appel qu'à un plasma d'hydrogène ordinaire de façon à éluder les problèmes liés à la technologie du tritium et aux neutrons. Pour M. Michel Trocheris, chef du Département de physique des plasmas et de la fusion contrôlée au C.E.A., trois étapes au moins séparent le JET du premier véritable réacteur expérimental correspondant à cette filière. Chaque étape exigera la construction d'un engin extrêmement ambitieux. Comme les chercheurs les plus optimistes n'attendent pas ce réacteur avant l'an 2 000, chacun peut constituer à sa guise d'ici là le « portrait-robot » de la future centrale thermonucléaire.

Dans la filière des micro-explosions, de minuscules gouttelettes de plasma subiraient une fusion « allumée » par de multiples rayons laser qui les frapperaient simultanément de toutes les directions. L'avènement d'un réacteur basé sur ce principe et produisant effectivement de l'énergie paraît plus lointain encore qu'avec la filière tokamak. Mais les deux procédés se rejoignent en ce qui concerne les enveloppes matérielles, les diverses enceintes, la genèse du tritium à partir du lithium, son confinement, enfin les problèmes posés par le refroidissement, l'évacuation de l'énergie et de l'hélium formés, les nuisances prévisibles. Le problème de la première paroi ma-

térielle entourant le plasma passionne de nombreux chercheurs. On pourrait faire appel à des fibres de carbone que la chaleur vaporiserait continuellement et qui seraient remplacées au fur et à mesure. Viendrait ensuite la fameuse couverture contenant le lithium générateur de tritium. C'est de cette couche qu'il faudrait à la fois extraire le plutonium éventuellement formé à partir d'uranium naturel, les « éponges » contenant le tritium et évacuer la chaleur représentant l'énergie récoltée. Pour cette dernière fonction, une circulation de lithium liquide est envisagée.

Un projet « fou furieux »

Entre la découverte des principes de la fission et le premier réacteur expérimental construit par Enrico Fermi, quatre années seulement se sont écoulées. Il n'en a pas été de même pour la fusion : les principes en sont connus depuis plusieurs décennies et il s'écoulera plusieurs décennies encore avant la construction du premier réacteur (si celui-ci voit jamais le jour). Pourtant, on sait depuis longtemps faire exploser des bombes à hydrogène. D'où la proposition faite par plusieurs chercheurs du laboratoire national de Los Alamos, aux Etats-Unis : au lieu de s'attaquer aux effroyables difficultés que suppose la domestication de la fusion, pourquoi ne pas faire exploser

tout simplement des bombes H, et recueillir l'énergie produite ?

Ce fut le projet Pacer, pour lequel plus de trois millions de francs ont été dépensés au titre des études préliminaires ; il visait à faire exploser deux fois par jour, au minimum, des bombes thermonucléaires de 10 à 100 kilotonnes de TNT dans une cavité souterraine. Un circuit d'eau aurait recueilli la chaleur créée, de façon à actionner des groupes turbo-alternateurs. Les défenseurs de cette incroyable idée ne garantissaient pas qu'une telle centrale serait rentable, mais ils affirmaient pouvoir s'en assurer au terme d'une étude dont la durée n'excéderait pas trois ans, pour un coût de 40 millions de dollars. « Je ne connais aucun autre programme de fusion qui soit en mesure de tenir une telle promesse, à aucun prix », déclarait M. Harold Agnew, directeur du laboratoire de Los Alamos. Cette personnalité insistait d'autre part sur le fait que le projet Pacer supposait une production de bombes H en série, ce qui en abaisserait fortement le coût unitaire. A cet « avantage » économique s'ajoutait la faculté d'utiliser au mieux les flux de neutrons produits : en entourant les bombes d'une couverture d'uranium naturel, on aurait fabriqué du plutonium en grandes quantités.

Où mettre en œuvre un tel procédé ? Les tenants du projet songeaient aux immenses lentilles de sel gemme présentes dans le sous-sol de divers Etats américains : une cavité convenable peut y être aménagée à bas prix, par simple dissolution sous l'effet d'une injection d'eau chaude. En outre, on estime que le sel manifesterait une certaine tendance à ressouder de lui-même les fissures provoquées par les explosions. Enfin, la présence du sel prouvait qu'il n'y avait pas d'eaux de ruissellement ; la radioactivité ne se répandrait donc pas.

Le projet Pacer a été officiellement abandonné cet été, quelques mois seulement après avoir été rendu public : entre temps, les habitants du Texas, de la Louisiane et du Mississippi - les Etats dont le sous-sol contient des lentilles de sel - ont fait savoir, avec toute la fermeté nécessaire, qu'ils ne toléreraient pas l'explosion annuelle de 700 bombes H sous leurs pieds ! Réaction compréhensible... « Il faut enterrer ce projet fou furieux et ne plus jamais y penser », s'est exclamé un membre du Congrès. Mais l'enterrement n'est peut-être pas définitif. Le général Graves, de l'Energy Research and Development Administration (ERDA), n'a pas exclu la reprise du projet Pacer, précisant toutefois que, dans ce cas, « on avertirait aussitôt le Congrès et les Etats concernés des localisations retenues ». Il est évidemment impossible de prévoir l'impact qu'aurait sur l'écologie une telle mise en pratique de la fusion « contrôlée » : de nombreuses explosions thermonucléaires souterraines ont déjà eu lieu, mais jamais au rythme de deux par jour pendant des années, et au même endroit ! On ne saurait d'ailleurs négliger le risque de fusion... incontrôlable, par la suite du détournement d'une bombe H, dès lors qu'il s'agirait d'objets fabriqués en série.

Sans doute faudra-t-il donc en passer par les réacteurs. Mais cela obligera à explorer bien des phénomènes encore obscurs. Ainsi, quoique justiciables d'études en laboratoire, les interactions des neutrons rapides et des divers rayonnement avec la matière demeurent-elles assez mal connues. Cela n'est pas sans conséquence : un rapport publié récemment aux Etats-Unis permet d'estimer les coûts imputables à cette relative ignorance.

Dans les réacteurs de fission à eau légère, l'action des rayonnements sur les gaines de combustibles (en alliages de zirconium) provoque des ruptures. Il en est résulté une dépense supérieure à 100 millions de dollars pour 1974, dépense dont on aurait pu faire l'économie si une meilleure compréhension de ces phénomènes avait permis d'apporter les améliorations voulues aux alliages. Le même rapport énumère les divers matériaux, envisageables pour un réacteur thermonucléaire, qui seront plus ou moins endommagés par le rayonnement - surtout par les neutrons. Ces détériorations revêtent ici une importance

toute particulière puisque, on l'a dit, le remplacement des parties devenues défectueuses en même temps que radioactives constituera une source très gênante de déchets.

Il y a donc tout intérêt à consacrer un important effort de recherche à ces interactions rayonnement-matière, pour être en mesure de concevoir, le moment venu, des réacteurs dont les différents composants auront une longévité maximale. On devra en outre sélectionner des matériaux dont l'activation neutronique conduit à des radioéléments de période aussi courte que possible. De cette façon, les déchets perdront leur activité rapidement et leur stockage pourra être bref.

Il semble relativement facile de satisfaire à cette dernière condition : les éléments favorables de ce point de vue sont connus. Il reste à espérer que l'on trouvera parmi eux des matériaux convenables. Rien ne prouve par exemple que tel métal, tout en donnant par activation un radioélément de courte période, présentera aussi, et à la fois, une bonne conductibilité électrique et une bonne résistance mécanique au bombardement des neutrons.

Notons que si le rayonnement risque d'abîmer les parois, celles-ci peuvent en retour contaminer le plasma en se volatilisant, et nuire ainsi à la réaction thermonucléaire. Les matériaux devront donc, pour convenir, satisfaire à un très grand nombre d'exigences différentes, voire contradictoires. Pensons que la filière tokamak devra utiliser — seul moyen de créer à un coût raisonnable les intenses champs magnétiques requis — des électro-aimants supra-conducteurs, et donc refroidis au voisinage du zéro absolu, pour confiner à quelques dizaines de centimètres un plasma porté à 100 millions de degrés ! On imagine la somme des contraintes à prendre en considération. Dans ces conditions, s'imposer en plus une pollution minimale pourrait sembler un luxe prohibitif...

L'action des rayonnements très énergétiques sur la matière comprend des phénomènes multiples. Les rayons X et gamma, les noyaux et les neutrons accélérés peuvent expulser les atomes superficiels des parois rencontrées, ou même des fragments de matière ; ils peuvent provoquer des fissures, des émissions d'électrons, des dislocations, fragiliser un alliage... La paroi, quant à elle, peut réfléchir vers la source les particules reçues, absorber des noyaux incidents. Autour de ces noyaux, des « cloques » se forment. L'apparition de vides au sein du matériau se traduit par des enflures : on a effectivement constaté des augmentations de volume, atteignant 20%, sur des pièces irradiées intensément. Des remèdes sont connus dans certains cas : on a récemment découvert que l'adjonction de traces de silicium ou de titane à certains alliages réduit considérablement les phénomènes d'enflure - personne ne sait d'ailleurs pourquoi.

Dans un réacteur à fusion, la paroi la plus proche du plasma pourrait subir, estime-t-on, une érosion de 0,1 mm par an sous le seul effet de l'exfoliation due aux chocs d'atomes d'hélium ou d'hydrogène. Une partie de ces atomes pénétrerait dans le métal ; incapables de s'y dissoudre, ils se rassembleraient dans ses interstices, le rendant très fragile.

La fusion réserve donc sans doute des surprises. Certaines d'entre elles pourraient être bonnes : plusieurs spécialistes ont supposé que ces puissants flux de neutrons ultra-rapides permettraient de détruire définitivement les déchets radio-actifs à longue durée de vie accumulés par la fission : l'irradiation les transformerait en radioéléments à courte période. C'est même la seule solution authentique jamais imaginée à ce problème. Elle demeure, il est vrai, largement hypothétique. D'ailleurs, avant de confier cette mission de salubrité publique à des réacteurs thermonucléaires, on devrait s'assurer, qu'en éliminant les déchets des autres réacteurs, ils n'en produiront pas davantage eux-mêmes...

Le tokamak du CEA, à Fontenay aux Roses : aujourd'hui le plus performant au monde, il sera prochainement « détrôné » par un instrument américain en voie d'achèvement.

