

**Zeitschrift:** Bulletin technique de la Suisse romande  
**Band:** 82 (1956)  
**Heft:** 22: Énergie nucléaire, fascicule no 2

**Artikel:** Certaines actions physiques des radiations  
**Autor:** Mercier, R.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-62090>

#### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 26.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## CERTAINES ACTIONS PHYSIQUES DES RADIATIONS

par R. MERCIER, professeur à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne

On trouve parfois sur les pâturages alpins des restes laissés par des montagnards, sous la forme de débris de verre. Si ceux-ci sont assez anciens (quelques années), ces débris sont teintés, souvent en violet. La même coloration s'observe sur le bulbe d'anciens tubes à rayons X. Il s'agit dans l'un et l'autre cas d'un effet produit dans le verre par l'irradiation prolongée aux rayons ultraviolets du soleil ou aux rayons de Röntgen. Un chauffage artificiel de ces pièces à l'obscurité fait apparaître une luminescence momentanée, à la suite de quoi la coloration a disparu ou changé de couleur. Nous rencontrons là un de ces effets qu'une radiation peut produire dans un solide.

Depuis la découverte de la radioactivité, d'autres effets ont été constatés dans les solides exposés plus ou moins longuement aux rayons alpha, gamma ou bêta qu'émettent les corps radioactifs. Mais c'est surtout dès le moment où l'on a disposé de réacteurs nucléaires que l'on a pu observer dans les matériaux dont ils sont formés des effets nouveaux et importants. Une étude systématique de tous ces phénomènes s'est imposée, elle est en plein développement actuellement.

Dans le réacteur nucléaire, où les flux neutroniques peuvent être très intenses ( $10^{13}$  neutrons/sec. cm $^2$ ) et où la radioactivité artificielle dépasse en intensité toutes les sources naturelles dont on pouvait disposer jusqu'à, ces radiations violentes provoquent dans les corps irradiés des actions dont les unes sont favorables du point de vue technologique, les autres catastrophiques. Ces dernières particulièrement doivent être parfaitement connues lorsqu'on se propose de construire une pile destinée à l'exploitation de l'énergie nucléaire qui doit donc fonctionner avec sécurité et de façon rentable. D'autre part, les premières peuvent conduire à des traitements technologiques nouveaux auxquels on pourra soumettre les matériaux métallurgiques ou autres. Le physicien, lui, voit avec ravissement de nouveaux problèmes surgir de cette fournaise et il se réjouit également au vu des nombreux renseignements qui viennent grossir son dossier toujours ouvert de l'affaire du « corps solide ».

Il n'est pas besoin d'être grand clerc en physique pour présumer des effets qu'une radiation énergique semble devoir produire au sein d'un agrégat solide. Songeons simplement que dans le réacteur on aura :

1. Des *fragments matériels* lourds issus d'un noyau fissile. Ces fragments sont éjectés avec une énergie de plusieurs dizaines de MeV au travers du solide<sup>1</sup>. Ils s'y fraient un chemin en percutant les atomes ou les ions qu'ils rencontrent. A chaque choc ils perdent une partie de leur énergie, fraction qui est absorbée par

l'atome frappé. Ces fragments ne vont pas loin, quelques dizaines de microns tout au plus, de sorte que leur action est limitée au volume où se trouve le « combustible » fissile du réacteur.

2. Des *neutrons rapides*, libérés au cours de la fission ou dans un processus ultérieur. Ces neutrons ont une pénétration beaucoup plus grande et ils pourront se mouvoir jusque dans les éléments structuraux du réacteur, voire dans le matériau qui en forme l'écran. Cette pénétration est due, rappelons-le, au fait que, dénués de charge électrique, les neutrons ne perdent de l'énergie qu'au moment où ils s'approchent suffisamment près d'un noyau pour que les forces nucléaires entrent en jeu. Ces neutrons sont relativement légers (ils ont même masse que le proton) mais leur quantité de mouvement est tout de même importante. Lors d'un choc avec un noyau du solide, ils ne lui transmettent qu'une faible part de leur énergie (cette part ne dépasse pas la fraction  $4/A$ ,  $A$  étant la masse atomique du noyau cible), mais cette part sera encore assez forte pour que le noyau choqué devienne lui-même un projectile efficace dans le solide. Ce choc bien ajusté est rare (on dit que la section efficace de ce choc est faible), aussi le neutron pourra-t-il décrire un long chemin avant d'avoir perdu son énergie initiale.

3. Des projectiles provenant des produits radioactifs résultant de la fission et qui ont une action ionisante plus ou moins intense sur les atomes qu'ils rencontrent.

D'ailleurs, il faudra aussi compter que les fragments de fission, les atomes choqués, les rayonnements bêta et gamma participent à cette action ionisante.

L'analyse des chocs entre projectiles et atomes ou ions fixés dans un réseau est compliquée, mais on peut faire des simplifications.

Prenons le cas d'une particule chargée ; elle sera capable d'exciter les électrons des ions rencontrés comme aussi de produire des chocs élastiques avec les noyaux. Mais ces derniers ne seront pas toujours éjectés, car il peut y avoir aussi excitations de vibrations mécaniques dans le réseau. En fait, pour que l'atome soit éjecté, il faut qu'il reçoive une énergie supérieure à son énergie de liaison ; il faut même qu'elle lui soit nettement supérieure, car en moyenne seule la moitié de l'énergie transférée sera utilisée pour cette éjection.

On a calculé la valeur moyenne de cette énergie  $\bar{E}$  transférée, qui n'est pas la même que si les deux partenaires étaient libres. En fait, elle s'exprime par :

$$\bar{E} = E_l L_n \left( \frac{E}{E_l} \cdot \frac{4MA}{(M + A)^2} \right)$$

où interviennent les masses  $M$  de la particule et  $A$  du noyau collisionné ainsi que l'énergie initiale  $E$  de

<sup>1</sup> Rappelons que le mégaelectronvolt ou Mev est l'énergie qu'accueille une particule ayant une charge unité ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  coulomb) et accélérée par une différence de potentiel de 1 million de volts.

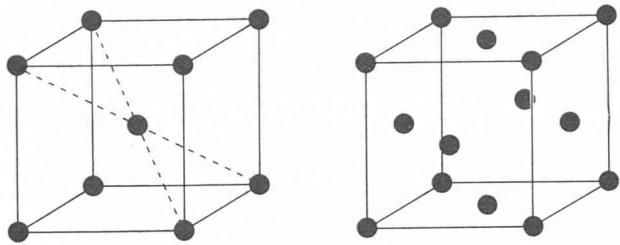


Fig. 1. — Mailles élémentaires de réseaux cubiques, centrées ou à face centrée.

la particule et l'énergie  $E_l$  de liaison. Le nombre d'atomes éjectés sera alors :

$$n = \frac{E_c}{2\bar{E}}$$

où  $E_c$  est l'énergie totale absorbée par l'ensemble des chocs.

Mais alors l'énergie cinétique des atomes éjectés pourra être assez grande pour qu'ils jouent eux-mêmes le rôle de projectiles déplaçant à leur tour d'autres atomes du réseau.

C'est ainsi que l'on peut calculer que :

- 1 proton de 2 MeV produit au total 10 éjections dans du graphite ;
- 1 proton de 20 MeV en produira 60 ;
- 1 particule bêta de 3 MeV sera capable d'en éjecter 5000 ;
- et 1 fragment de fission avec 200 MeV déplacera près de 24 000 atomes dans l'uranium solide.

On a calculé également que le neutron de 2 MeV était capable d'éjecter 1870 atomes de carbone dans le graphite, ce qui est relativement élevé.

On imagine alors l'importance des dégâts qui seront causés dans la matière soumise aux bombardements cumulés de tous ces projectiles.

Quelle est alors la nature des dégâts engendrés ? Pour le comprendre, il est nécessaire de rappeler quelques notions relatives à la physique du solide.

La majeure partie des solides dont nous parlons est constituée par des *cristallites*, car rares sont ceux qui peuvent être considérés comme *amorphes*.

Dans un cristal, les éléments, sous forme d'ions, sont ordonnés dans l'espace en rangées équidistantes (fig. 1), formant ainsi des cubes, des tétraèdres, des prismes hexagonaux, etc., tous identiques et identiquement juxtaposés. L'étude aux rayons X permet de déterminer le type de l'arrangement et ses dimensions. On dit qu'il y a *ordre à grande distance*. Par contre, dans le liquide, on peut encore reconnaître un certain arrangement des ions voisins (ou des atomes), mais l'ordonnance fait place à un désordre lorsqu'on envisage des groupements qui ne sont pas immédiatement contigus (fig. 2).

Dans un unicristal, un cristal de quartz par exemple, les faces naturelles reflètent l'ordonnance interne du solide (fig. 3). Dans un morceau de métal technique, par contre, les cristaux dont il est constitué sont plus ou moins microscopiques et irrégulièrement placés les uns contre les autres (fig. 4). L'étude métallographique

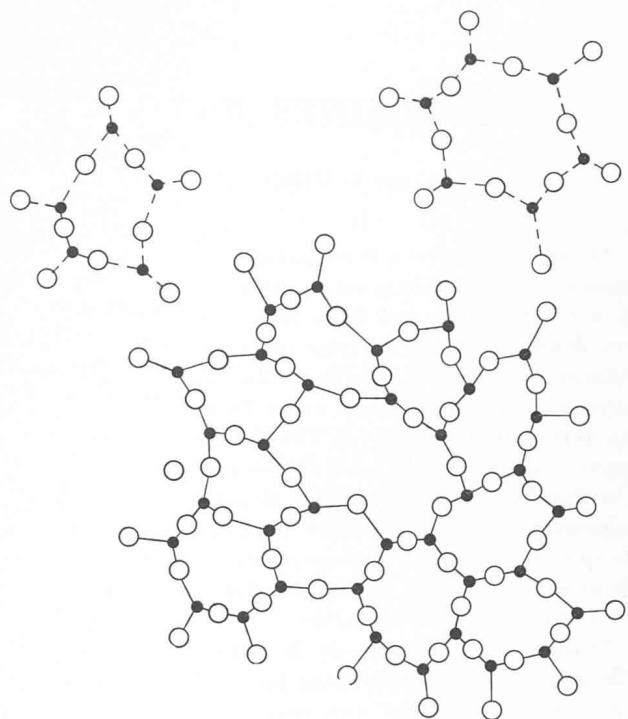


Fig. 2. — Ordonnance à faible distance et désordre à grande distance dans un liquide (verre de silice).

décèle fort bien ces cristallites, qu'anciennement l'on croyait parfaits. Or, l'étude plus poussée du solide a montré que tout cristal, qu'il soit gros ou petit, présente des irrégularités que l'analyse aux rayons X n'accuse pas, mais qui jouent un rôle fondamental dans le comportement mécanique et électrique du solide. Les principales sont :

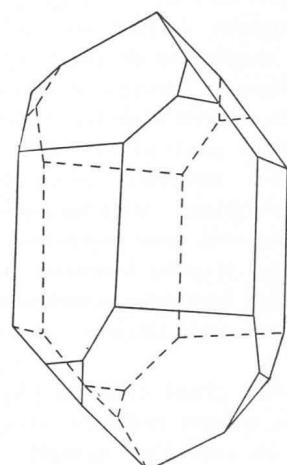


Fig. 3.  
Unicristal de quartz naturel.

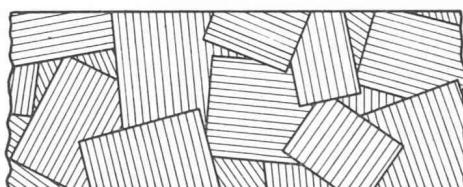


Fig. 4. — Feutre cristallin formant un métal technique.

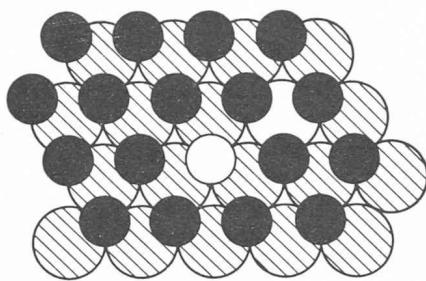


Fig. 5. — Sites vacants dans un réseau cristallin imparfait. (Schottky)

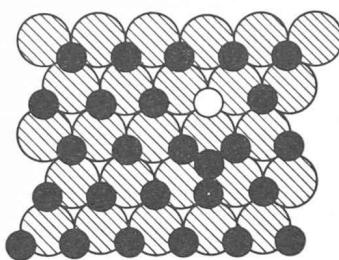


Fig. 6. — Ion logé dans un interstice ; réseau cristallin imparfait selon Frenkel.

1. Les *sites vacants* ou lacunes ou défaut de Schottky (fig. 5). Par-ci, par-là, il manque un ion ; cette absence n'est pas rédhibitoire et autour de ce trou ou de cette vacance, le cristal est construit correctement. Normalement, ce défaut se produit au cours de la construction du solide (solidification ou précipitation), l'élément, l'ion manquant préférant se placer sur un autre point de la surface.

2. Les *éléments interstitiels* (ou défaut de Frenkel) (fig. 6). Au lieu de se trouver au point prescrit géométriquement, l'ion est venu se placer dans l'espace libre laissé entre les ions réticulaires ; il se trouve bloqué dans son coin mais il pourra passer d'un interstice au voisin s'il reçoit l'énergie suffisante pour le faire (25 eV par exemple). Un ion intersticiel peut donc *diffuser* si l'agitation thermique est assez intense, ce qui, grâce aux fluctuations, se présente plus ou moins souvent suivant la température. Il en est de même d'ailleurs des lacunes de Schottky, qui peuvent être comblées par un ion voisin, ce dernier laissant alors une lacune à sa place précédente.

Ces considérations sont fondamentales dans la théorie des métaux et des semi-conducteurs.

3. Des irrégularités plus insidieuses existent dans tous les cristaux : ce sont les *dislocations* (fig. 7). Il s'agit de surfaces entières où l'ordonnance est détruite et qui sont responsables d'un affaiblissement de la résistance du solide aux sollicitations tangentielles (fig. 8).

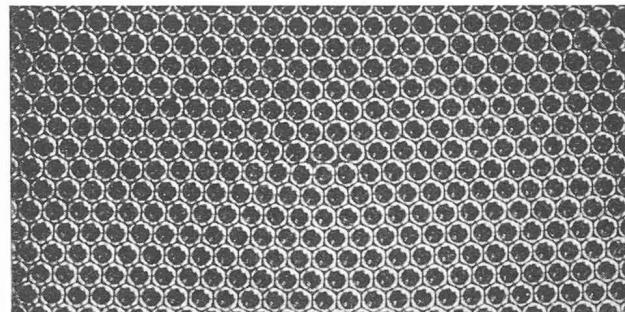


Fig. 7. — Dislocation. Dans ce modèle de bulles, une rangée aberrante vient détruire la symétrie de l'édifice.

Ces dislocations peuvent être produites par la présence d'un atome étranger (fig. 9) plus volumineux que les autres ; mais il n'est pas nécessaire que cet atome soit plus lourd, car *l'ordre des dimensions atomiques* n'est pas celui des numéros atomiques (fig. 10). Il arrive aussi que la dislocation naîsse spontanément lors de la solidification de la phase liquide, sans nécessiter un atome étranger. Cela se produira surtout lorsque cette solidification sera très rapide. Une fois produite, une dislocation peut aussi se déplacer et on peut prévoir des accumulations ou au contraire des morcellements des zones disloquées, ce qui entraînera des modifications importantes dans le degré de solidité de l'édifice.

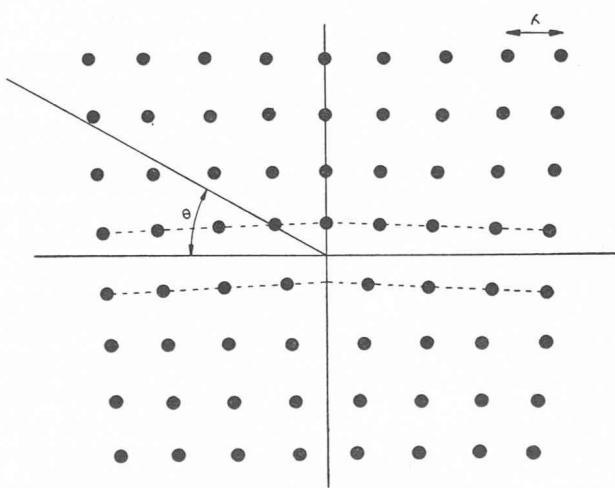


Fig. 8. — Dislocation. La rangée aberrante affaiblit la résistance au glissement.

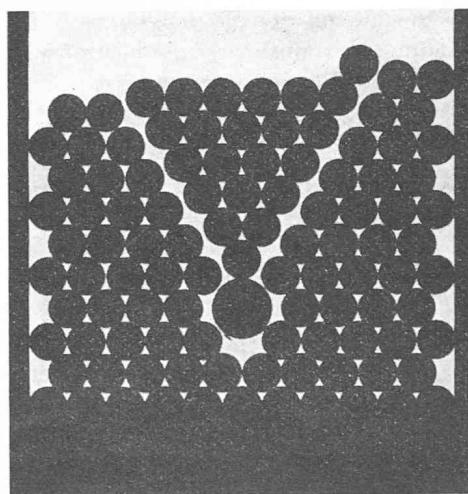


Fig. 9. — Effet d'un atome étranger dans un réseau plan.

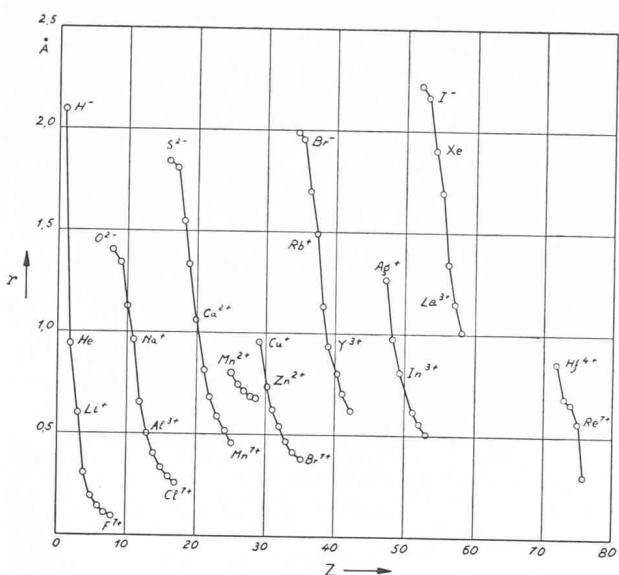


Fig. 10. — Rayon d'atomes et d'ions en fonction de leur numéro atomique Z.

Ce sont ces trois sortes de défauts qui peuvent être invoqués pour tenter d'expliquer les effets que les radiations intenses créent dans le solide.

On imaginera facilement que les chocs dont il a été question tout à l'heure expulsent les ions de leur site normal (production d'une lacune) et les expédient dans des situations interstitielles ; ou bien encore que par une radioactivité consécutive à une absorption de neutron, un atome normal se transforme en atome étranger.

Si la concentration des atomes interstitiels devient assez forte, un nouvel effet, dont je n'ai pas encore parlé, pourra contribuer à la formation de dislocations. Cet effet est le *choc thermique*.

*Choc thermique* : Dans ce phénomène, les projectiles transmettent aux ions du réseau des énergies qui dépassent largement l'énergie de couplage des ions entre eux. Il en résulte qu'une partie de cette énergie sert à exciter des vibrations intenses mais très locales dans le réseau, et l'amplitude de ces vibrations peut dépasser la distance réticulaire. Cela revient à dire que la cohérence de phase de ces vibrations cesse d'être assurée et le cristal *fond* localement. Il y a un vrai « choc de température » qui ne subsiste pas longtemps, du fait que tout l'entourage cristallin participe bientôt à l'évacuation de cette chaleur libérée dans un petit volume. Après avoir fondu brusquement, le cristal se resolidifie presque instantanément ; c'est alors que les irrégularités (vacances ou excès interstitiels) peuvent jouer le rôle de germes de dislocations. L'intégrité géométrique du cristal en est affectée. Ce choc thermique peut par exemple intéresser 5000 atomes à la fois et leur température s'élève jusqu'à 1000 degrés durant  $10^{-10}$  secondes.

Il a été question plus haut des effets d'ionisation que l'on peut attendre de tous les agents énergiques. Cette ionisation aura pour conséquence des ruptures de liaisons chimiques et l'on observera dans les élastomères, par exemple, ou dans les plastomères, la formation de radicaux libres. Les propriétés mécaniques et électriques de ces corps s'en ressentiront plus ou moins forte-

ment, par exemple les isolants perdant leurs qualités.

Dans ce qui précède, nous avons totalement négligé l'agitation thermique persistante du réseau cristallin. Elle aura pour effet de faciliter la diffusion des sites vacants ou des ions interstitiels, plus encore celle des dislocations ; bref, si elle est suffisante, elle pourra permettre un rétablissement plus ou moins rapide de l'ordre initial que les radiations auront détruit. Aussi devrait-on distinguer :

- 1° les effets permanents tels que les transmutations nucléaires, que l'agitation thermique ne saurait supprimer ;
- 2° les effets réversibles, qu'un traitement thermique, un recuit subséquent sera capable de faire disparaître rapidement ;
- 3° les effets transitaires, conséquences de l'état ionisé temporaire et qui disparaissent en même temps que cette ionisation.

Enumérons maintenant quelques exemples typiques.

Si l'on introduit dans le sein d'un réacteur nucléaire un unicristal de cuivre<sup>1</sup>, on constate que sa résistance au glissement, qui est normalement assez faible ( $20 \text{ kg/cm}^2$ ), augmente dans une mesure étonnante, puisqu'elle peut s'élèver jusqu'à  $750 \text{ kg/cm}^2$  après une irradiation de  $10^{19}$  neutrons par  $\text{cm}^2$ . Il y a là un effet qui est semblable à celui que l'on obtient en faisant un alliage, ce qui est confirmé par le comportement du solide au moment du fluage. Toutefois, les calculs montrent qu'un seul atome interstitiel produit par l'irradiation est beaucoup plus efficace (en ce qui concerne la résistance mécanique) que le remplacement dans le réseau d'un atome de cuivre par un atome de zinc.

Simultanément, on constate un accroissement du module d'élasticité (module de Young  $E$ ) ainsi qu'une forte diminution de la viscosité interne. Les vibrations y sont beaucoup moins amorties que dans le métal normal et il est possible de faire des diapasons de cuivre comme celui qui fut présenté à l'exposition de Genève en 1955. A noter que ce résultat a été obtenu par une irradiation qui n'a pas dépassé  $10^{18} \text{ n/cm}^2$ ; 1 site interstitiel sur 1000 était alors occupé.

La résistance électrique  $\rho$ , par contre, augmente aussi, surtout à basse température, alors que l'étude aux rayons X ne décèle pas de changement de la distance internodale dans la maille élémentaire ; d'ailleurs la densité ne varie pas. On prévoit, par ce qui précède, que les réacteurs nucléaires offriront à la métallurgie de nouveaux procédés d'amélioration de matériaux de haute valeur.

Les conditions ne se présentent plus du tout sous un jour aussi favorable dans le cas de l'uranium où les dommages macroscopiques consistent en cassures (pulvérisations), distorsions et excroissances, dont l'étude a été faite très soigneusement.

On sait d'abord que l'uranium présente trois modifications allotropiques, trois phases différentes dans le domaine de 0 à  $600^\circ$ . Il suffira alors d'un simple traitement thermique approprié pour que se produisent des tensions internes considérables, provoquant une fissuration, ces tensions étant simplement dues aux dilatations

<sup>1</sup> BILLINGTON, *Radiation damage in reactor materials*. 1955.

anisotropes lors du passage à l'une des températures de transition. C'est d'ailleurs bien ce que l'on observe déjà, en l'absence de toute irradiation. Mais les neutrons ajoutent encore leurs dégâts sous forme d'irrégularités dans le massif cristallin. Tous ces effets sont très sensibles à la métallurgie du métal et en particulier à son histoire thermique, aussi la construction d'un réacteur comporte-t-elle un problème technologique compliqué.

Le graphite, qui joue un rôle important dans le fonctionnement de certaines piles, souffre fortement de l'irradiation des neutrons. J'ai déjà indiqué le nombre des déplacements qui peuvent y être produits par divers agents, mais je n'ai pas cité le fait que ce graphite subit une dilatation anisotrope qui peut atteindre jusqu'à 14 % le long de son axe ternaire. Sa résistivité thermique croît simultanément avec le temps d'irradiation, ce qui diminue ses qualités lors d'une utilisation technique. Mais ces effets sont réversibles et un recuit à 2000° C rétablit l'état initial.

Un effet semblable se produit dans le quartz qui, lui, est un cristal ionique. Une irradiation de  $10^{20}$  neutrons par  $\text{cm}^2$  produit une diminution de sa densité qui va jusqu'à 15 %, et qui est surtout due à une dilatation de la maille élémentaire le long de l'axe optique.

Cette dilatation est d'ailleurs accompagnée d'un tel désordre interne que le quartz peut être presque considéré comme amorphe. C'est du moins ce que décèle l'étude aux rayons X de cette modification. Toutefois la cohésion de ce solide ne semble pas souffrir, car le quartz présente toujours ses faces intactes. Par contre, la conductibilité thermique tombe au  $1/10$  de sa valeur normale, elle se rapproche de celle du verre de silice. Un recuit ultérieur à 950° pendant une demi-heure donne alors à cet agrégat une consistance étonnante où apparaissent une foule de canaux minuscules, parallèles à l'axe optique ; il s'agit certainement de zones où les tensions internes de traction n'ont pu être soutenues par les ions qui se sont libérés en formant de nouvelles surfaces libres.

Un cas qui intéresse l'industrie est celui du diamant. Cette autre forme allotropique du carbone, qui présente une structure tétraédrique, est beaucoup plus dur que le graphite et l'on peut attribuer cette dureté exceptionnelle à la structure du réseau et à l'énergie de liaison. Or, cette énergie est extrêmement sensible à la présence d'impuretés, même lorsque leur concentration est très faible (1 à 100 000) ; ces impuretés provoquent aussi des colorations plus ou moins prononcées et influent sur la constante réticulaire (mesurée aux rayons X) qui peut différer de quelques dix-millièmes d'Angström d'un échantillon à l'autre.

L'irradiation aux neutrons (surtout aux neutrons lents) entraîne précisément un changement de teinte du diamant et la nouvelle couleur est métastable, en ce sens qu'elle ne disparaît pas d'elle-même (il ne semble pas y avoir de relaxation) mais qu'un recuit à 300° la fait disparaître. Ce qui se produit dans ce cas consiste très probablement en des lacunes produites par les chocs, et les sites vacants se transforment en *centres colorants* (*F centers*) où sont piégés des électrons. Nous retrouvons ici le phénomène de coloration du verre dont il a été question au début de cet exposé. Simultanément

la dureté du diamant est modifiée. On espère trouver un traitement qui, combinant l'irradiation aux neutrons et les recuits, aurait pour effet d'améliorer les qualités industrielles des diamants naturels et de ce fait de rendre utilisable une plus grande fraction des gemmes extraites du sol.

Enfin, dernier exemple, une classe particulière de solides, les semi-conducteurs, a été également étudiée et les résultats obtenus présentent un aspect assez intéressant, comme on va le voir. On sait que dans les semi-conducteurs, les ions étrangers jouent un rôle fondamental, surtout si leur valence diffère de celle du support normal. C'est ainsi que si dans le germanium (qui est tétravalent) des ions d'arsenic (pentavalent) sont substitués à quelques ions de germanium, l'arsenic devient la cause de libération d'un électron qui participe à la conduction électrique du cristal. On dit que l'ion As est un *donneur* et le semi-conducteur sera du type *n* (c'est-à-dire négatif).. Par contre, si par places on substitue au germanium un ion de bore ou de Gallium (qui sont trivalents), ce dernier s'incorporera un des électrons de conduction, laissant à la place de celui-ci un « trou » mobile qui jouera le rôle d'une charge positive participant à la conduction électrique. On parlera alors d'un ion *accepteur* et le germanium sera devenu un conducteur du type *p*.

La technique de préparation des semi-conducteurs comporte une opération assez délicate qui consiste à injecter à la bonne place et en faible concentration l'ion donneur ou accepteur. Et c'est précisément là que le réacteur intervient.

En effet, les neutrons thermiques provoquent la transmutation du germanium. Celui-ci contient cinq isotopes en concentrations diverses ; le germanium de masse atomique 70 (Ge 70) se transmute en gallium stable, tandis que les Ge 74 et 76 deviennent de l'arsenic stable également. Par suite, l'irradiation neutronique transforme un germanium pur, dit à conduction intrinsèque, en un semi-conducteur du type *p*. eu égard à la prépondérance de 3 ions de gallium (trivalent) contre 1 d'arsenic (pentavalent).

Un traitement semblable du silicium le fait passer dans la classe des « types *n* ». Passons sur un certain nombre de complications qui doivent intervenir dans le traitement et qui résultent de l'action des autres projectiles présents dans une pile et arrivons à un aspect intéressant de l'utilisation de ces semi-conducteurs.

On peut construire des « jonctions » formées d'une paire de semi-conducteurs de types inverses, *P* et *N*. Celles-ci donnent une solution au problème de l'exploitation de l'énergie nucléaire par voie directe, c'est-à-dire sans passer par l'intermédiaire de l'énergie calorifique. Mais attention, pas d'optimisme exagéré, le rendement actuellement réalisé est encore bien trop faible pour que le procédé soit rentable et jusqu'ici il n'implique que l'exploitation de la radioactivité. En effet, ces jonctions jouent le rôle de générateurs électriques et peuvent fournir un courant lorsqu'elles sont irradiées par de la lumière visible, ultraviolette ou encore par des rayons bêta peu énergétiques. Avec une telle jonction, irradiée par une source radioactive de 50 millicuries (Sr 90), on a pu obtenir une force

électromotrice de 250 millivolts fournissant un courant de court-circuit de 10 microampères.

Il existe encore un autre domaine d'utilisation de ces jonctions, c'est celui, beaucoup plus avancé en ce qui concerne les réalisations techniques, de l'utilisation directe de l'énergie solaire. Les couples thermoélectriques réalisés au moyen de ces semi-conducteurs autorisent de grands espoirs dans cette direction. A tout prendre, cette application elle aussi se doit d'être citée dans ce cours, car le soleil n'est qu'un énorme réacteur nucléaire à fusion où l'hydrogène se transmute finalement en hélium.

Les résultats dont il est fait état dans cet exposé ne représentent qu'une faible part de ce que l'on sait actuellement, mais le but de cet exposé est de donner l'impression que parmi les gros problèmes que pose la mise en exploitation industrielle de l'énergie nucléaire, ceux qui concernent l'aspect technologique de la question ne sont pas les moindres et que leurs résolutions sont et ne pourront être que le résultat de l'action conjuguée des spécialistes en physique nucléaire, en physique du solide, en métallurgie et en chimie et des ingénieurs. Plus que dans toute autre technique, cette collaboration est indispensable.

## THÉORIE DE LA SÉPARATION DES ISOTOPES

par P. DE HALLER

directeur des Services scientifiques de Sulzer Frères, Winterthour

Après les brillants exposés sur la physique nucléaire qui précédent, le sujet que je dois traiter paraîtra bien sec et peu spectaculaire. Si je l'ai choisi, c'est non seulement à cause de l'importance incontestable de ces techniques dans le domaine du génie nucléaire, mais aussi parce qu'elles sont un exemple typique de collaboration entre des branches parallèles de la science. Le professeur Mercier a relevé ce caractère de la technique moderne, où physique, chimie, métallurgie et, *last but not least*, l'art de l'ingénieur doivent nécessairement unir leurs efforts en vue du but commun.

Le problème de la séparation des isotopes, qui était jusqu'à ces dernières années du ressort du laboratoire seulement, est entré dans le domaine de la technique industrielle. Il est clair que les méthodes ne peuvent pas simplement être transposées par un changement d'échelle, mais qu'elles doivent être jugées sur la base de critères tout à fait différents, dont l'un des plus importants est le prix de revient. Mon exposé s'adressant avant tout à des ingénieurs, c'est sur ce côté de la question que j'insisterai, et non sur les mécanismes physiques des procédés de séparation. Je distinguerai donc entre les méthodes de laboratoires proprement dites, universelles, mais produisant des quantités de l'ordre du mg ou du g seulement, dont le type est le spectrographe de masse d'Aston, semi-industrielle, production de l'ordre du kg, destinée par exemple à la fabrication de  $B^{10}$  pour détecteurs de neutrons, ou industrielle à grande échelle pour la séparation de  $U^{235}$ , de  $D_2$  ou  $D_2O$  ou de  $N^{15}$ .

Une installation de séparation comporte en principe un ensemble d'appareils identiques, montés en série ou en parallèle, dans chacun desquels on provoque une séparation partielle, un enrichissement. Un bon nombre de caractéristiques d'une telle installation ne dépend pas du procédé physique mis en œuvre dans chaque élément, mais d'un ou deux facteurs seulement suffisant à définir ses propriétés. On peut donc construire une théorie tout à fait générale permettant de chercher les conditions de fonctionnement optimum, d'établir des

comparaisons de prix de revient sans qu'il soit nécessaire de préciser le principe utilisé, qui sera indifféremment la diffusion moléculaire, la diffusion thermique, la distillation, etc.

C'est à cette étude que je consacrerai la première partie de cet exposé, réservant à la deuxième partie la discussion des divers procédés.

Deux isotopes ont par définition un même nombre de protons dans leur noyau, ils ont donc un même nombre total d'électrons et particulièrement un même nombre d'électrons de valence. Leurs propriétés chimiques seront donc sensiblement identiques, et pour leur séparation on devra avoir recours à des procédés physiques ou physico-chimiques, en particulier à ceux faisant intervenir la masse des atomes ou des molécules, puisque c'est cette différence de masse qui est leur caractère fondamental. Il est cependant rare qu'on puisse travailler avec l'élément pur, qui ne se trouve en général pas à l'état liquide ou gazeux pour les pressions et températures usuelles. On utilise des combinaisons chimiques avec un ou plusieurs autres éléments, ce qui introduit des complications parce que cet autre élément peut aussi avoir des isotopes, de sorte que le nombre de molécules différentes dans le mélange s'accroît considérablement. Par exemple l'eau  $H_2O$  est un mélange des différents oxydes suivants :  $H_2O^{16}$ ,  $H_2O^{17}$ ,  $H_2O^{18}$ ,  $D_2O^{16}$ ,  $D_2O^{17}$ ,  $D_2O^{18}$  de poids atomiques 18, 19, 20, 20, 21, 22. On voit qu'un procédé fondé uniquement sur la différence des poids moléculaires ne sépare pas  $D_2O^{16}$  et  $H_2O^{18}$ . Or  $O^{18}$  absorbe fortement les neutrons et est donc indésirable. Un autre inconvénient est le fait que la différence de masse de molécules complexes est plus faible que celle de l'élément pur : pour l'eau encore, ce rapport est de 20/18 au lieu de 2/1 pour l'hydrogène. Pour un élément lourd tel que l'uranium, l'écart devient très faible : il est de moins de 1 % entre les poids de  $U^{235}F_6$  et  $U^{238}F_6$ , et la séparation devient d'autant plus difficile. Par contre lorsque les deux composantes du mélange sont aussi semblables, on peut le considérer comme parfait. En particulier la