

## La radioactivité : c'est naturel

Jacques PEULVÉ

### 1. INTRODUCTION

On dit stables les atomes à l'équilibre parfait.

On les dit **radioactifs** ou instables s'ils ont un excès d'énergie ou de particules, l'équilibre est atteint par **désintégration** et émission de **rayonnements** ( $\eta$ ) **neutron**, ( $\alpha$ ) **alpha**, ( $\beta$ ) **bêta** ou ( $\gamma$ ) **gamma**.

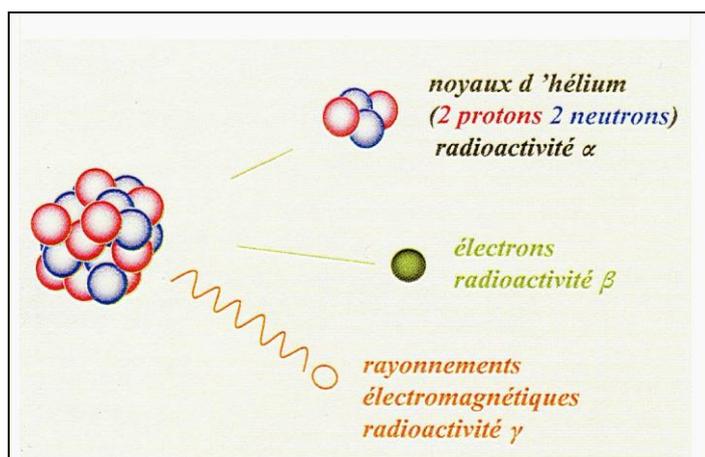
La **radioactivité naturelle** a été découverte à la fin du 19<sup>ème</sup> siècle par H. Becquerel, puis le **polonium** et le **radium** par Pierre et Marie Curie, ils ont mis en évidence la **décroissance**. Enfin, en 1934 la possibilité de créer la **radioactivité artificielle** a été découverte par les Joliot-Curie.

La voie était ouverte pour la **fission** aboutissant aux **réacteurs nucléaires** de production d'électricité ainsi que pour l'étude de la **fusion thermonucléaire**.

### 2. ORIGINE NATURELLE

Les atomes, si le système était parfait, comporteraient un équilibre entre les nucléons, les électrons et l'ensemble de leurs énergies. Nous aurions affaire à des atomes dits "stables". Il faut les agresser avec des forces considérables pour les perturber.

Mais de nombreux atomes n'ont pas ce bel équilibre : ils contiennent plus ou moins de nucléons, plus ou moins d'électrons et pour chacun plus ou moins d'énergie et ils sont instables. La plupart des atomes étaient instables à l'origine des temps et certains le restent même encore aujourd'hui ! Et pour longtemps.



Mais la Nature veut atteindre le grand équilibre, pour cela les atomes "instables" ont tendance à expulser les éléments en trop : nucléons (un **neutron** ou deux neutrons et deux protons = émission **alpha**) les électrons (émission **bêta**) ou de l'énergie (émission **gamma**).

Par habitude de langage on dit que l'atome se désintègre, en fait il tend à la stabilité en émettant des **rayonnements** : cet atome est "**radioactif**" en provoquant de la "**radioactivité**". On dit que c'est un **radioélément** (c'est-à-dire un élément chimique radioactif).

Source : Le journal - CEA/Saclay 09/2001.

La radioactivité  $\alpha$  (alpha) correspond à l'émission par un noyau de deux protons et deux neutrons (c'est le noyau de l'hélium).

La radioactivité  $\beta$  (bêta) provient de la transformation dans le noyau :

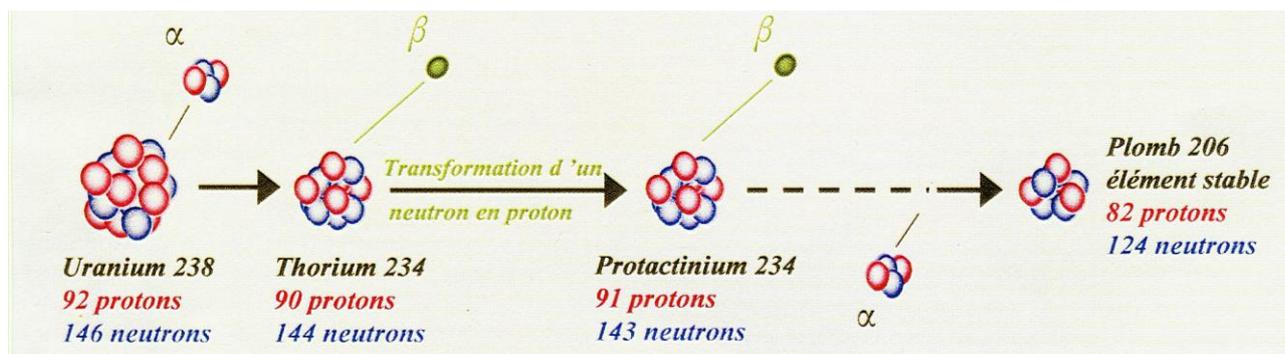
- soit d'un neutron en proton avec l'émission d'un électron (émission  $\beta^-$ ),
- soit d'un proton en neutron avec émission d'un positon (émission  $\beta^+$ , observée notamment suite à une fission).

La radioactivité  $\gamma$  (gamma) n'est pas constituée par l'émission d'une particule, mais par la libération d'énergie du noyau sous forme d'un rayonnement électromagnétique (de longueur d'onde plus courte que celle de la lumière et beaucoup plus courte que celle des ondes TV ou radio).

Pour être complet il faut ajouter les rayons  $\chi$  (X), ce sont des ondes électromagnétiques de fréquence comprise entre celles des g et des ultraviolets, elles proviennent du nuage d'électrons entourant le noyau.

La radioactivité  $\eta$  (neutron) est produite par l'émission spontanée d'un neutron par un noyau ou de 2 à 3 neutrons lors d'une fission.

La stabilité est rarement atteinte au premier coup, et pour l'atteindre un noyau radioactif va subir plusieurs étapes de stabilisation (désintégrations) en cascade. Passant de père en fils jusqu'à l'élément stable.

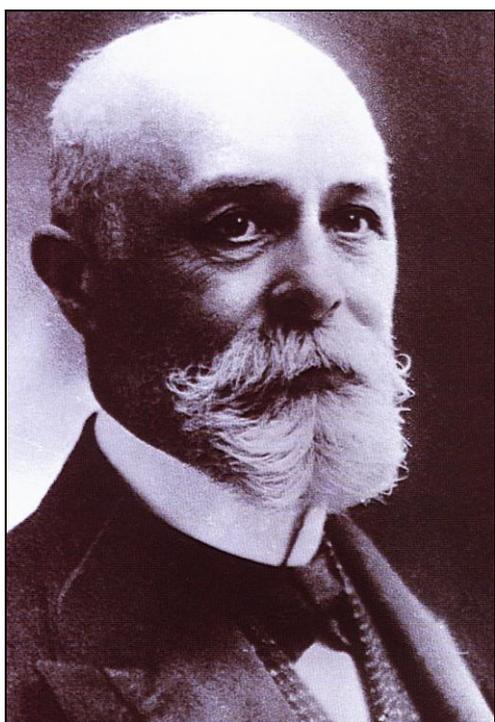


Source : Le journal - CEA/Saclay 09/2001.

Dans l'exemple ci-dessus, pour aller de l' $U^{238}$  au  $Pb^{206}$  on passe par 13 étapes dont le thorium 234, le radium 226, le radon 222, etc.

### 3. LES DÉCOUVERTES

Oui ! Il s'agit bien d'une découverte progressive par de nombreux scientifiques et non pas d'une invention par quelque apprenti sorcier exubérant.



Engagées dès la Grèce antique, les recherches sur la matière se sont poursuivies aux XVIII<sup>e</sup> et XIX<sup>e</sup> siècles par Dalton, Lavoisier, Gay-Lussac, et notamment la découverte de l'**uranium** annoncée à l'Académie royale de Prusse en 1787 par Martin Heinrich Klaporth.

Elles ont fait une rapide progression à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.

Suite à la découverte des rayons X en fin de 1895 par Wilhelm Conrad Röntgen, le Professeur Henri Becquerel voulant confirmer une expérience sur la luminescence place des sels d'uranyle sur une plaque photographique protégée par deux épaisses feuilles de papier noir, afin d'exposer le tout au soleil.

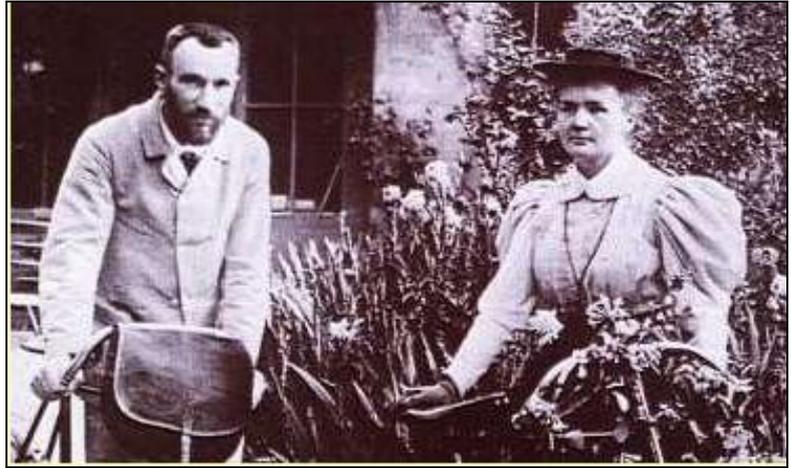
Après plusieurs jours sans soleil, Henri Becquerel décide le 1<sup>er</sup> mars 1896 de développer quand même la plaque photographique et découvre que le sel d'uranium émettait spontanément un rayonnement pénétrant qu'il appela "rayons uraniques".

Henri Becquerel  
Archives Curie et Joliot-Curie

Deux ans plus tard Pierre et Marie Curie annonçaient la découverte du polonium, donnant naissance au mot **radioactivité** puis, six mois plus tard, celle du radium créant ainsi la radiochimie en démontrant les propriétés de l'atome.

Pierre et Marie Curie

Archives Curie et Joliot-Curie



Ces travaux s'inscrivent avec la découverte du noyau par Ernest Rutherford et la classification des éléments chimiques par le chimiste russe Dimitri I. Mendéléïev.

La mise en évidence des mécanismes naturels de la radioactivité, vieux comme le monde, a été une véritable révolution des bases scientifiques de l'humanité. Elle a bouleversé la compréhension de l'Univers et de son évolution. La découverte de ces nouvelles connaissances a profondément influencé l'Histoire de l'HUMANITÉ et la vie des hommes.

#### 4. ACTIVITÉ OU DÉCROISSANCE

Nous avons vu que la transformation d'un noyau s'accompagne d'émission radioactive, on définit l'activité d'un corps radioactif par le nombre de désintégrations de ses atomes en une seconde. Elle se mesure en becquerels (symbole Bq) avec la définition suivante :

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde.}$$

C'est une toute petite unité de mesure, par exemple, la radioactivité d'un litre de lait est de 60 Bq, celle du corps d'un adulte de 70 kg avoisine 10 000 Bq.

Un gramme (1 g) de radium équivaut à  $3,7 \cdot 10^{10}$  Bq, c'est l'ancienne unité de radioactivité.

A ce jour, les physiciens n'ont pas mis en évidence de lois régissant les conditions et le moment où une stabilisation (désintégration) va se produire. Par contre, ils ont établi statistiquement, de façon précise, le temps que met un élément pour que se produise la moitié des désintégrations nécessaires avant d'atteindre la stabilité. On appelle ce temps "la période radioactive", avec le symbole T.

La décroissance est plus ou moins rapide en fonction des radioéléments elle va de quelques fractions de seconde à plusieurs milliards d'années.

A ce jour, les physiciens n'ont pas mis en évidence de lois régissant les conditions et le moment où une stabilisation (désintégration) va se produire. Par contre, ils ont établi statistiquement, de façon précise, le temps que met un élément pour que se produise la moitié des désintégrations nécessaires avant d'atteindre la stabilité.

On appelle ce temps "la période radioactive", avec le symbole T. La décroissance est plus ou moins rapide en fonction des radioéléments elle va de quelques fractions de seconde à plusieurs milliards d'années.

Isotope	Période
Polonium 214	0,164 s
Oxygène 15	2 min
Iode 131	8 jours
Cobalt 60	5,3 ans
Carbone 14	5730 ans
Isotope	Plutonium 239
Uranium 238	4,5 milliards d'années

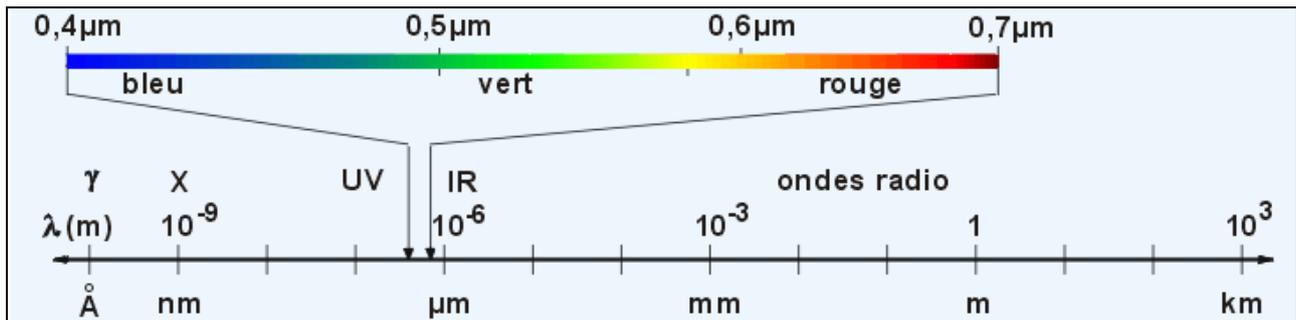
Quelques exemples de périodes radioactives figurent dans le tableau ci-contre.

Bien entendu, la radioactivité spécifique, c'est-à-dire le nombre de "stabilisations" (de "désintégrations") est inversement proportionnel à la période. Un élément de très longue période (Uranium 238) émet de temps en temps un rayonnement, alors qu'un élément de très courte période émet tous ses rayonnements dans un temps très court.

## 5. RAYONNEMENTS

Nous vivons dans un champ de nombreux rayonnements que nos sens (la vue, l'ouïe, l'odorat, le goût, le toucher) ne peuvent pas toujours percevoir. Certains sont bien supportés sans créer d'inquiétude, comme les ondes radio ou TV, les téléphones portables, les radars ou les fours à micro-ondes.

### Lumière visible



$\gamma$  = rayons gamma, X = rayons X, UV = ultra-violet, IR = infra-rouge

L'émission des particules ou des énergies que nous avons décrites précédemment se produit aléatoirement dans toutes les directions, sur toute l'aire sphérique du noyau émetteur, d'où les appellations de "rayon" et de "rayonnement".

Que l'on soit parvenu à parler de "radiation" et ensuite "d'irradiation" ne constitue que des extravagances de langage, dans tous les cas il ne s'agit que d'émission de particules ou d'énergies, toutes deux parfaitement naturelles.

De cette radiation sphérique aléatoire il résulte deux conséquences :

- un observateur n'est concerné par le rayonnement qu'en fonction de l'angle solide qu'il représente vis-à-vis de la sphère vue du noyau émetteur (rapport de la surface qu'il représente à la surface totale de la sphère, à la distance où il se trouve),
- le nombre de rayons perçus par une surface donnée décroît selon le carré de la distance qui la sépare du noyau émetteur.

Très concrètement, il suffit de s'éloigner de la source émettrice pour réduire, en fonction du carré de la distance, le nombre de rayons susceptibles de nous atteindre ; ce qui constitue la première protection contre les rayonnements.

A cela, il faut ajouter que les rayons ont un parcours, dans les matériaux qu'ils traversent, inversement proportionnel à la densité de ceux-ci.

C'est ainsi que :

- un rayon  $\alpha$  (alpha) a un parcours de quelques centimètres dans l'air, mais une feuille de papier l'arrête,
- un rayon  $\beta$  (béta) a un parcours de quelques mètres dans l'air, mais une feuille d'aluminium l'arrête,
- les rayons  $\gamma$  (gamma) ou X ont un parcours de plusieurs centaines de mètres et il faut plusieurs centimètres d'acier ou de béton pour les arrêter.

## 6. INTERACTION RAYONNEMENT – MATIÈRE

Sous l'effet d'un rayonnement, d'un choc ou simplement de la lumière, un électron peut se détacher de son orbite modifiant la charge électrique de l'atome. La perte d'un, ou plusieurs électrons transforme l'atome en ion positif (cation), alors que l'atome qui récupère un électron libéré devient un ion négatif (anion). Ce phénomène est appelé **ionisation**, il gouverne la plupart des réactions des rayonnements sur la matière ou les tissus vivants.

L'autre mode d'interaction provoque le changement d'orbite d'un électron des couches internes, on l'appelle : excitation. Le changement de niveau d'énergie s'accompagne de l'émission d'un ou plusieurs photons (brève impulsion lumineuse).

Ces effets sont produits par les particules  $\alpha$  et  $\beta$ , mais également par les rayonnements électromagnétiques : les  $\chi$ , les  $\gamma$  et certains ultraviolets (**UV**). On parle d'**exposition** aux rayonnements.

## 7. DÉTECTION

Comme pour les ondes radio, il faut convertir les rayonnements ionisants en signaux sonores ou visuels pour les rendre perceptibles à nos sens.

Le premier système, utilisé par Henri Becquerel après la **plaque photographique** (toujours utilisée de nos jours), a été l'**électroscope à feuille d'or**. Deux feuilles souples sont pendues par une extrémité, la même charge électrique leur est appliquée, ce qui les fait se repousser l'une l'autre et s'écarter. L'interaction d'un rayon dans le gaz contenu entre les deux feuilles crée une paire d'ions qui va neutraliser une charge, entraînant le rapprochement des feuilles. L'écartement de celles-ci est donc représentatif du rayonnement auquel elles sont soumises.

Vint ensuite le compteur GEIGER-MULLER. On applique une tension d'un millier de volts entre des électrodes placées dans un volume de gaz fermé. Le rayonnement déclenche une avalanche transformée en impulsion électrique. Il suffit de compter ces impulsions pour connaître le niveau d'exposition. Le compteur proportionnel, plus sophistiqué, fonctionne sur le même principe.

La **chambre d'ionisation** est composée d'un cylindre et d'une électrode centrale auxquels on applique une tension de 200 à 400 volts qui capte les paires d'ions. Le courant électrique ainsi créé est amplifié et, soit affiché sur un cadran, soit enregistré sur un papier défilant. Il s'agit d'une mesure fiable, parfaitement représentative de la **dose de rayonnements** reçue.

En associant un **scintillateur** plastique et un **photomultiplicateur** il est possible de mesurer les photons représentatifs du niveau et du type de rayonnement.

Enfin, plus récemment, les **semi-conducteurs** et les détecteurs **thermoluminescents** ont fait faire d'énormes progrès aux méthodes de détection et de mesure, à tel point qu'aucun rayonnement de quelle que sorte que ce soit ne peut leur échapper.

*NDLA : Bien que ne pouvant pas être perçu directement par les sens de l'homme, le rayonnement ionisant est un phénomène physique aisément détectable. Il est donc facile de pouvoir s'en protéger.*

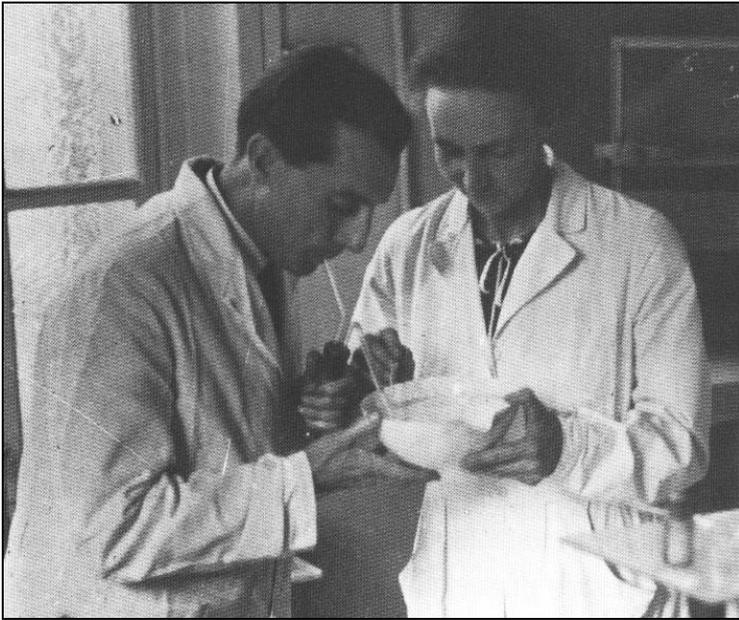
## 8. FISSION

### 8.1. RADIOACTIVITÉ PROVOQUÉE

Un noyau lourd subit une **fission** lorsqu'il se fragmente, de façon spontanée (décroissance) ou provoquée (par l'impact d'un neutron), en deux ou plusieurs autres noyaux plus légers. La somme des neutrons de ces **produits de fission** est inférieure au nombre des neutrons du noyau lourd d'origine.

Les neutrons ainsi émis peuvent, à leur tour, provoquer la fission d'autres noyaux et ainsi de suite en réaction en chaîne, le tout étant accompagné de la libération d'une quantité importante d'énergie. Les produits de fission sont eux-mêmes radioactifs.

Il n'y a pas de radioactivité "artificielle" en opposition à la radioactivité "naturelle".



C'est au début de 1934, avec l'exposition d'une feuille d'aluminium à un rayonnement  $\alpha$  (alpha), qu'Irène et Frédéric Joliot-Curie ont produit un isotope du phosphore qui se désintérait comme les éléments radioactifs naturels.

Ce phénomène bien naturel a malheureusement été appelé radioactivité artificielle semant la crainte et la suspicion sur une découverte fondamentale pour la connaissance de notre univers.

Irène et Frédéric Joliot-Curie  
Graines de science – Université de Paris-Sud

Il existe l'instabilité des atomes :

- qu'elle soit constatée pour les radionucléides toujours présents dans la nature, du fait de leur très longue période de décroissance (potassium 40 de période 1,26 milliard d'années ou thorium 232 de période 14,05 milliards d'années) ou du fait de leur production permanente par les rayons cosmiques ou solaires (tritium et le plus connu  $^{14}\text{C}$  ou carbone 14),
- ou qu'elle soit provoquée par une réaction de fission obtenue par des physiciens, ou par la nature. En effet, il a été découvert en 1972 qu'il y a près de 2 milliards d'années des réacteurs de fission nucléaire ont fonctionné naturellement dans le gisement d'uranium d'Oklo au Gabon ([voir fiche GASN N° 15](#)).

Cela a été possible du fait de la composition isotopique de l'uranium à l'époque : 97 % en  $^{238}\text{U}$  et 3 % en  $^{235}\text{U}$ , qui est l'élément **fissile** (c'est-à-dire susceptible d'entretenir la réaction de fission). Aujourd'hui, du fait de la décroissance, cette concentration isotopique est de 99,27 % en  $^{238}\text{U}$  de période 4,47 milliards d'années et de 0,7 % en  $^{235}\text{U}$  de période 704 millions d'années (plus quelques autres isotopes mineurs).

## 8.2. LES NEUTRONS THERMIQUES

Les teneurs isotopiques de l'uranium des réacteurs naturels d'Oklo correspondent à celles utilisées dans les réacteurs à eau pressurisée (REP) français après **enrichissement** en  $^{235}\text{U}$  de l'uranium naturel.

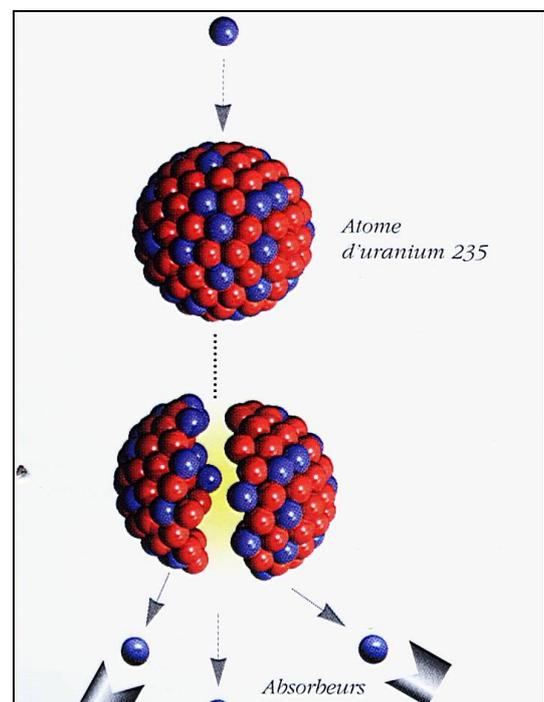
C'est en 1934 qu'Irène et Frédéric Joliot-Curie provoquent des modifications d'atomes en projetant sur une feuille d'aluminium des rayonnements alpha.

Ils ont produit le premier élément radioactif provoqué (malencontreusement appelé "artificiel"). Cette découverte leur a valu le Prix Nobel de Chimie en 1935.

Malheureusement, seul l'isotope 235 de l'uranium est aisément fissile avec des neutrons lents, ce qui ne permet d'utiliser qu'un peu moins de 1 % de l'énergie de l'uranium naturel dans les réacteurs à neutrons thermiques, comme les réacteurs refroidis et modérés à l'eau, qui constituent la très grande majorité des réacteurs électrogènes dans le monde ([voir article GASN correspondant](#)).

**La fission de tous les noyaux d'un kilogramme d'uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ ) produit autant d'énergie que la combustion de 2.500 tonnes de charbon.**

La fission  
Centenaire de la découverte de la radioactivité



Si la masse de matière contenant des atomes aux noyaux fissiles est faible, la réaction de fission s'arrête d'elle-même, le système est **sous-critique**. Si cette masse est suffisamment importante il y a **divergence**, pouvant aller jusqu'à l'explosion (principe de la bombe A).

Dans les réacteurs nucléaires, la matière fissile est répartie dans des **éléments combustibles**, qui sont séparés par un corps qui ralentit et absorbe des neutrons. Le tout est calculé de façon à ce que la réaction ne puisse s'emballer. On dit que l'on est en situation de **criticité contrôlée** due à des **neutrons lents** (dont on a absorbé une partie de l'énergie).

### 8.3. LES NEUTRONS RAPIDES

En développant la filière des réacteurs à neutrons rapides, la France avait misé sur les **surgénérateurs** (Phénix et Super-Phénix). Cette filière permet la fission des atomes d' $^{238}\text{U}$  et de  $^{239}\text{Pu}$  tout en transformant plus d'atomes d' $^{238}\text{U}$  en  $^{239}\text{Pu}$  qu'elle n'en consomme, d'où le nom de surgénérateur.

Elle offre ainsi la possibilité de multiplier par un facteur de près de 100 la récupération de l'énergie de l'uranium ([voir article GAENA correspondant](#)).

## 9. LA FUSION

Contrairement à la fission où l'on "casse" des noyaux lourds, la **fusion** consiste à réunir deux noyaux légers, en produisant une quantité d'énergie bien supérieure. Le Soleil et les étoiles entretiennent naturellement les réactions de fusion thermonucléaires.

Mais, pour obtenir la fusion il faut vaincre les forces nucléaires qui s'opposent au rapprochement des noyaux. Il y a quarante ans les chercheurs du CEA ont développé le "TOKOMAK" (Tore magnétique à courant) à Fontenay aux Roses, équipements permettant d'étudier cette réaction.

Le JET (Joint European Torus) construit en Grande Bretagne avec les équipes françaises ainsi que Tore-Supra à Cadarache ont permis de poursuivre les études. Enfin, différents pays (dont la France, le Royaume Uni, le Japon, etc.) se sont associés pour construire ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) avec pour objectif de démontrer la faisabilité d'un réacteur de fusion ([voir fiche GAENA N° 16](#)).