

Dossier “Radioactivité naturelle” - I

LA RADIOACTIVITE ET LA GEOLOGIE

Robert Six

I. HISTORIQUE

Nous abordons un nouveau chapitre de notre dossier nucléaire en nous attaquant aux **phénomènes radioactifs en géologie**. Cette science que l'on désigne du nom de **radiogéologie** cherche à découvrir l'influence de la radioactivité naturelle sur les phénomènes géologiques. Elle est donc liée à la physique, la chimie et la géologie. Le premier qui en parle est **VERNADSKI**, en 1933 à Paris, avec la parution de son ouvrage « *Les problèmes de la radiogéologie* ».

Vladimir Ivanovitch VERNADSKI (* 12-03-1863 - † 6-01-1945), minéralogiste et chimiste russe, est le cofondateur de la **géochimie** avec **Victor GOLDSCHMIDT** (* 27-01-1888, Zurich - † 20-03-1947, Oslo).

VERNADSKI a étudié les **effets des radiations solaires et cosmiques sur les organismes vivants**. En 1924, il précise la notion de **biosphère** dans une optique biogéographique et écologique. Il est le premier à envisager **l'impact de la déforestation sur le climat**, mais l'époque ne se prête pas à ce genre d'inquiétude, la nature étant dotée de capacités régénératrices inépuisables. Son modèle pour la planète se compose de différentes « **couches** » en interaction :

- la **lithosphère**, noyau de roche et d'eau ;
- l'**atmosphère**, enveloppe gazeuse constituant l'air ;
- la **biosphère**, constituée par la vie ;
- la **technosphère** résultant des activités humaines ;
- la **noosphère** ou sphère de la pensée.

On sent que sa conception du monde est **déterministe**. Elle a été reprise par le paléontologue et philosophe chrétien français **TEILHARD de CHARDIN** (° 1-05-1881 - † 10-04-1955) dont l'aboutissement de la pensée est justement la **noosphère** qui conduit à un point **Omega**. La notion de biosphère anticipe également celle de **Gaïa** développée par **James LOVELOCK**. (26-07-1919)

Victor Moritz GOLDSCHMIDT appartient à une longue lignée de scientifiques et philosophes. Ses parents, le chimiste autrichien **Henrich J. GOLDSCHMIDT** (° 12-04-1857 - † 20-09-1937) et **Amelie KOEHNE** le prénomment en hommage à l'un des collègues d'Henrich, le chimiste **Victor MEYER** (° 8-09-1848 - † 8-01-1897), également issu d'une famille de fortes personnalités intellectuelles. La famille s'installe en Norvège en 1901, après que Henrich eut accepté un poste de professeur de chimie à Kristiania (Oslo).

Victor se lance dans les études universitaires et son ascension scientifique est fulgurante. Il devient chercheur, sans même passer les examens, à l'âge de 21 ans, en 1909.

Ses premières contributions se font dans les domaines de la **géologie** et de la **minéralogie** avec deux travaux qui constituent sa thèse de doctorat, décrochée deux ans plus tard : « *Die Kontaktmetamorphose im Kristianiagebiet* » et « *Geologisch-petrographische Studien im Hochgebirge des südlichen Norwegens* ».

En 1912, il se voit décerner la plus haute distinction scientifique norvégienne, le prix Fridtjof Nansen, pour son travail « *Die Kontaktmetamorphose im Kristiania gebiet* ». La même année, il devient Docent (professeur associé) de minéralogie et pétrographie à l'université d'Oslo, appelée *Det Kongelige Frederiks Universitet*.

En 1914, il fait une demande de poste à Stockholm, mais avant que celle-ci soit approuvée par le roi, le *Kristiania University College*, à Oslo, lui propose une chaire chez elle, procédure fort rapide et inhabituelle pour la nomination d'un nouveau professeur. En 1929, il part pour Göttingen mais revient à Oslo en 1935.

La **géochimie actuelle** peut être rattachée à une série de publications de **GOLDSCHMIDT**, regroupées sous le titre « *Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente* ». Cette nouvelle discipline décrit la **distribution des éléments chimiques dans la nature**, ce qui permet de dynamiser la minéralogie, l'ensemble de la chimie théorique et la cristallographie. Les travaux de **GOLDSCHMIDT** sur l'**atome** et les **radiations nucléaires** ont contribué à stimuler cette dernière discipline, avec l'émergence des notions de **liaison covalente**, **ionique**, de **forces de Van der Waals**. Il s'est également montré intéressé par les applications techniques de ses travaux, ainsi lui doit-on l'usage de l'olivine dans l'industrie. Il a dirigé durant plusieurs années le *Statens Råstoffkomoté*. Il est également l'auteur de la « **classification Goldsmidt des éléments** ».

Durant l'occupation allemande lors de la Seconde Guerre Mondiale, il est arrêté à cause de ses origines juives. Il est libéré grâce à la pression de ses collègues et de la résistance norvégienne avant sa déportation en Allemagne. Il fuit vers la Suède puis l'Angleterre où il rejoint une partie de la famille de sa femme. Après la guerre, il revient à Oslo et y meurt à l'âge de 59 ans.

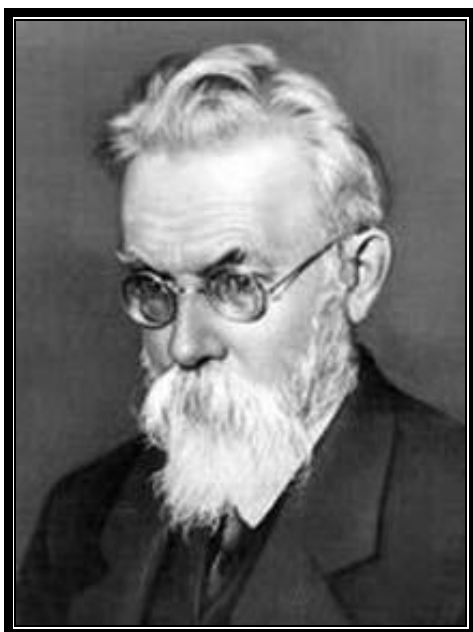


Fig. 1 - Vladimir Ivanovitch VERNADSKI

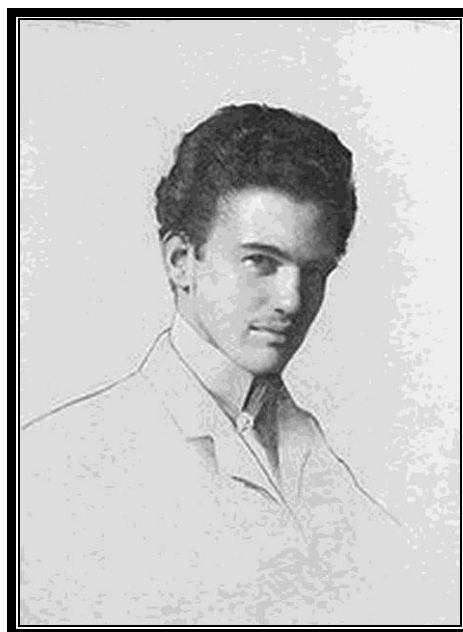


Fig. 2 - Victor Moritz GOLDSCHMIDT, jeune

II. LA RADIOACTIVITE NATURELLE

Rappelons que la **radioactivité** est un **phénomène naturel** lié à la substance même de la matière dont l'univers est formé.

Ainsi, pour faire simple, l'énergie du Soleil est le résultat de la fusion de deux noyaux d'hydrogène qui fait intervenir l'activité β . Sans cette réaction essentielle, l'univers ne contiendrait que de l'hydrogène et les grandes usines que sont les étoiles ne pourraient synthétiser les éléments plus lourds qui constituent notre univers

.Sans la radioactivité, notre planète serait un astre depuis longtemps refroidit. C'est grâce à sa chaleur, entretenue par la **désintégration des éléments radioactifs** à longue durée de vie, que notre Terre a pu présenter les **conditions favorables à l'apparition de la Vie**. C'est dans un bain constant de radioactivité que celle-ci s'est développée, s'y est adaptée et a pu évoluée. Il est donc vain de vouloir s'en soustraire à tout prix.

A. Origines des sources de rayonnements

Les origines de la radioactivité naturelle sont :

- d'une part la présence d'**éléments radioactifs dans la croûte et le manteau terrestre** (**rayonnement tellurique - 0,45 à 0,54 mSv**),
- d'autre part les **rayons cosmiques** qui groupent toutes les particules de haute énergie émises par le soleil et le reste de l'univers (**rayonnement cosmique - 0,30 à 0,36 mSv**).

Heureusement, l'atmosphère et le champ magnétique terrestre servent de bouclier et en réduisent l'importance.

Le bombardement des atomes de l'atmosphère génère aussi des éléments radioactifs dont les plus connus sont le carbone-14 et le tritium.

Les éléments radioactifs naturels que l'on trouve dans les diverses roches, le sont à l'état diffus, sous forme de **traces**, à l'exception des **concentrations minérales** qui en permettent l'exploitation rentable. Toutefois, leur présence, grâce aux instruments modernes, est facilement décelable.

Pratiquement, toutes **les roches contiennent des éléments radioactifs**. Ce sont pour la majeure partie, le **thorium 232** ($1,6 \cdot 10^{14}$ tonnes), l'**uranium 238** ($5 \cdot 10^{13}$ tonnes), le **potassium 40** qui constitue environ un dix millième du potassium naturel, et dans une moindre mesure l'uranium 235 ($3,5 \cdot 10^{11}$ tonnes).

Ainsi, les granites ont une teneur moyenne en uranium de 3 parties par million (3 ppm) et en thorium de 3 fois plus. Les roches sédimentaires sont en générale moins riches mais non négligeables.

B. Doses émises par la radioactivité naturelle

1. Notion de dose

Les **rayonnements** émis par les éléments radioactifs sont **porteurs d'énergie** qui est transmise par **ionisation** à la matière qu'ils traversent, laquelle peut être un tissu du corps humain. Cette énergie est traduite en **dose d'exposition** qui tient compte de l'**effet biologique** des radiations : c'est la **dose efficace**, évaluée pour l'organisme entier. En termes de définition, la **dose** est la **quantité d'énergie transmise par unité de masse de matière**.

2. Unités de mesure

L'**énergie** est exprimée en **joule** (J), tandis que la **dose** se mesure en **gray** (Gy) qui équivaut à 1 J/Kg de matière. Du point de vue énergétique, il s'agit d'un dépôt minime. Il faudrait 4.000 Gy pour élever la température de l'eau de 1°C. Mais il ne s'agit pas d'une énergie distribuée dans tout un volume comme la chaleur ordinaire. Elle est au contraire très localisée et concentrée le long du trajet de particules ionisantes.

3. Dose équivalente

Lorsque l'on a affaire à des tissus vivants, l'**effet biologique** n'est pas seulement fonction de la quantité d'énergie reçue mais également du **type de rayonnement**. Un rayonnement α (noyau d'He) cause plus de dégâts qu'un rayonnement β (électron) ou γ (photon). Pour cette raison, les scientifiques ont introduit, en radioprotection et en médecine nucléaire, la notion d'**équivalent de dose**, qui est un perfectionnement de la **dose absorbée**.

La première unité de dose absorbée est définie **en 1920** : c'est le **rad**. Il est remplacé aujourd'hui par le **gray**, le Gy valant 100 rads. Les radiologues expriment la dose délivrée par leurs appareils en Gy ou mGy.

Cette notion de dose absorbée s'est montrée insuffisante en radioprotection. En 1950, on s'aperçut, à l'occasion d'irradiation mélangeant divers rayonnements qu'un Gy de neutrons était plus cancérigène qu'un Gy de photons. Ceci amena à introduire la notion de **dose équivalente**.

La **dose absorbée moyenne** est multipliée par un **facteur de pondération** qui tient compte du type de rayonnement (photons, électrons, neutrons, alpha). L'unité de dose équivalente contemporaine du rad, le « **rem** », est devenue le **sievert** qui vaut 100 rems, soit 1 J/Kg.

4. Irradiation reçue par l'organisme humain

Les **éléments radioactifs naturels** et leurs descendants interviennent pour environ un sixième, soit **0,5 mSv/an**, à l'irradiation naturelle de notre organisme.

Le **radon 222**, seul descendant radioactif gazeux de l' U^{238} , intervient pour moitié dans la dose de radioactivité naturelle, soit **1,5 mSv/an**. Elle varie fortement d'une région ou d'un endroit à l'autre. C'est pourquoi, il est essentiel d'aérer caves, appartements et mines se trouvant dans des zones susceptibles de produire ce gaz.

De plus, nous ingérons ces éléments par **voie alimentaire**, et la dose ainsi absorbée compte pour **0,5 mSv/an**. Les buveurs réguliers d'eau minérale verront ce chiffre augmenter.

Je me rappelle que dans le temps, la dose radioactive d'une eau minérale était indiquée sur l'étiquette au même titre que les teneurs des différents minéraux qu'elle contenait. Autre temps, autre préoccupation.

D'autre part, les **rayons cosmiques** nous transpercent à raison de $1/\text{cm}^2/\text{sec}$. La dose qui en découle s'élève à **0,3 mSv/an** au niveau de la mer. Elle s'élève avec l'altitude et ceux qui connaissent la dose la plus forte sont les astronautes qui gravitent autour de la planète et les voyageurs aériens intercontinentaux. Un voyage en avion, à une altitude de 10.000 m occasionne un débit de dose (dose par heure) de $1,65 \mu\text{Sv/h}$.

Enfin, chacun de nous est **légèrement radioactif** à cause du K^{40} et du C^{14} stockés dans notre organisme (**0,25 à 0,30 mSv**).

L'**ensemble** de ces contributions varie selon les lieux de **1,5 à 3 mSv/an** et atteint des valeurs nettement supérieures dans les régions granitiques ou naturellement riches en uranium (fig. 3 et 4).

En conclusion, nous recevons chaque année une **dose équivalente de 3 mSv de radioactivité naturelle**, à laquelle il faut ajouter environ **1,5 mSv d'origine médicale** (radiographie, injections d'isotopes) et **0,06 mSv** liée aux **activités humaines**.

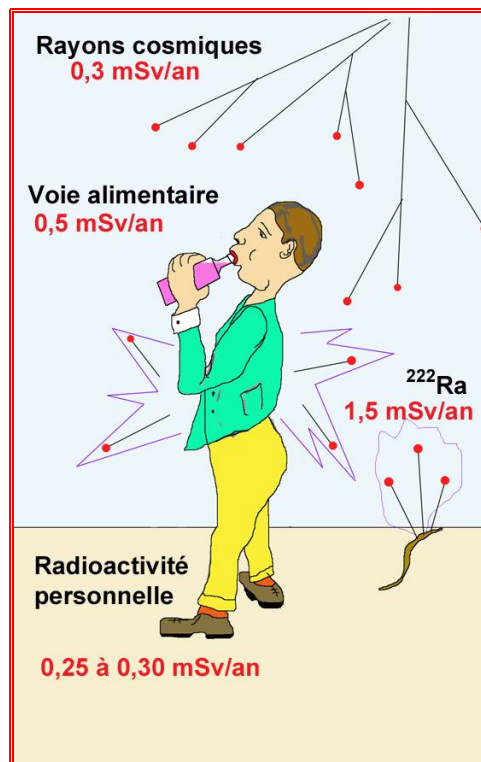


Fig. 3 – Dose individuelle par an

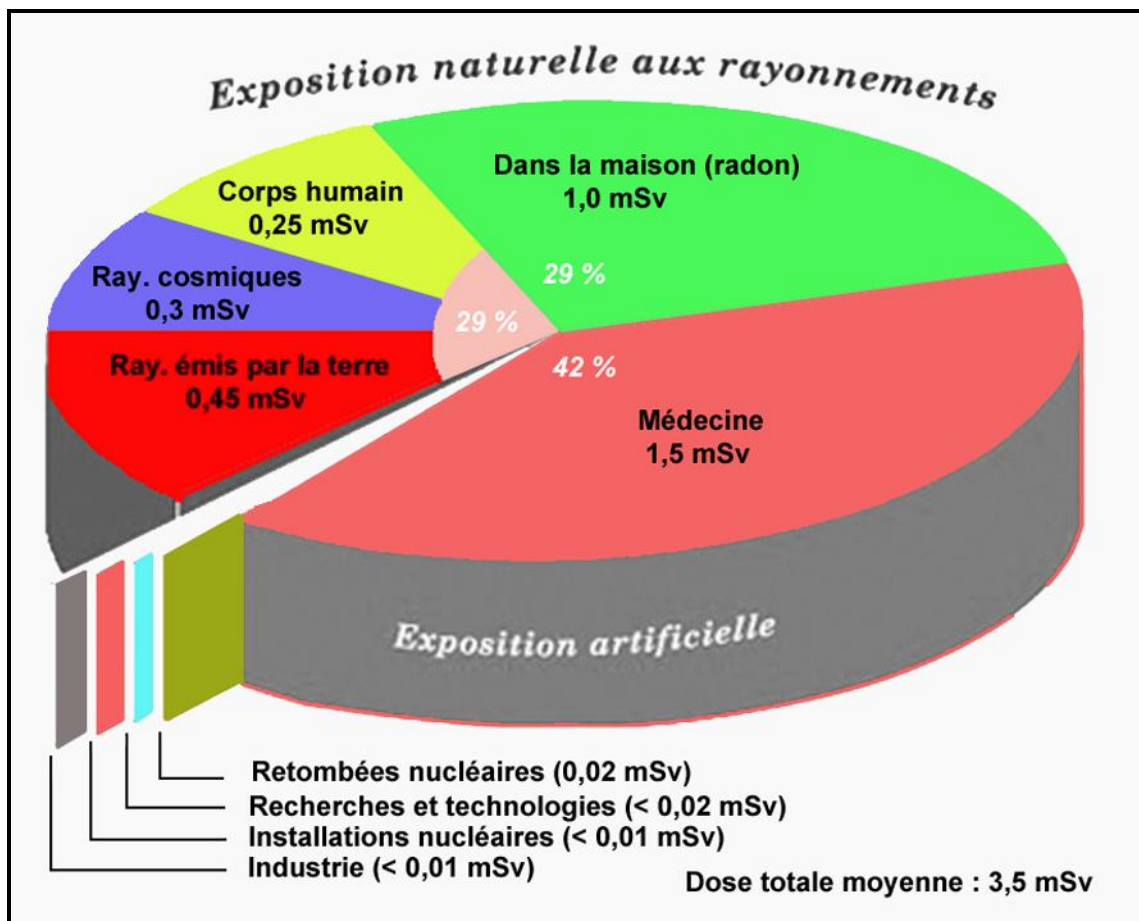


Fig. 4 - Expositions naturelles et artificielles

Évaluation en France des sources d'exposition aux rayonnements. Selon cette estimation, la dose totale s'élève à 3,5 mSv, la dose naturelle à 2 mSv et la dose artificielle à 1,5 mSv. La dose naturelle, dont la composante principale est due au radon, correspond à environ 60 % du total. L'exposition artificielle a pour origine principale les examens et traitements médicaux. L'industrie, la recherche et le nucléaire n'y contribuent que pour 1 %. Ces répartitions sont des moyennes. (© IN2P3)

Dans nos pays, on estime la **dose totale annuelle d'exposition par personne** à **3,5 mSv** en ce début de **XXI^e siècle**. Elle était de **2,4 mSv** il y a **100 ans**. L'augmentation est due principalement au développement des examens médicaux, l'exposition naturelle n'ayant pas changé.

C. Répartition du rayonnement naturel sur le territoire national (fig. 5)

En **Belgique**, le **rayonnement tellurique** est relativement faible et se répartit approximativement comme suit :

- **régions sablonneuses**, de l'ordre de **0,30 mSv** ;
- **régions à sol argileux** ou **marneux**, de **0,45 mSv** en moyenne ;
- **régions à sol schisteux** (Ardenne), aux alentours de **0,60 mSv**.

Il existe dans nos Ardennes des zones qui présentent des **anomalies radiogéniques** avec une **diversité géologique** importante reflétant une métallogénie complexe, comme celles de Daverdisse, de Porcheresse, de la région de Chiny ou de Oizy. On y trouve des niveaux radioactifs relativement élevés en relation avec la tectonique locale.

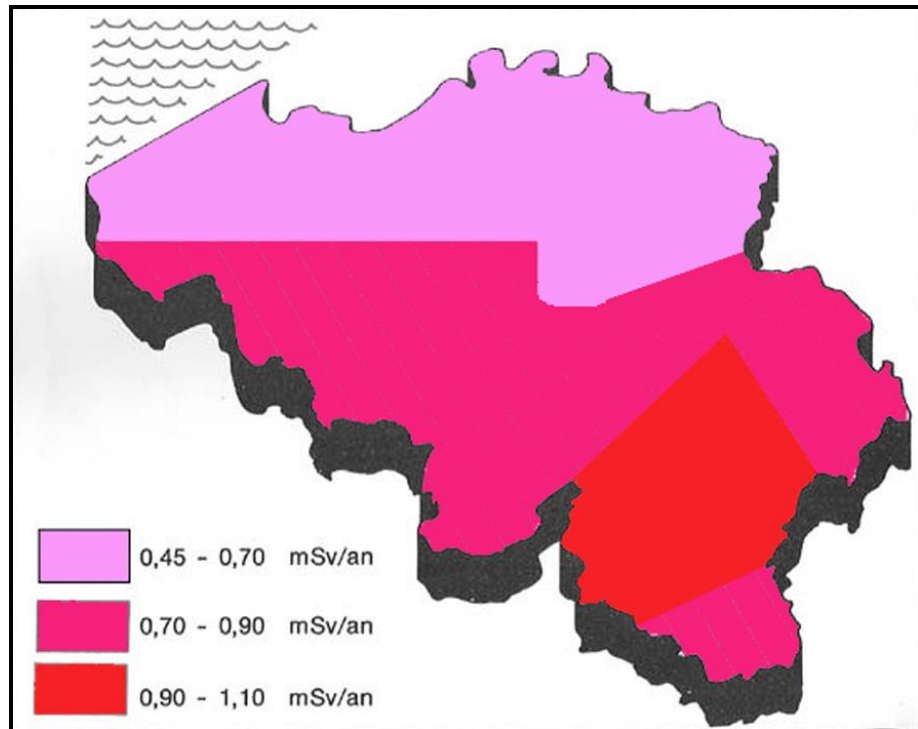


Fig. 5 – Rayonnement au niveau de la Belgique. Etant donné qu'en Belgique les dénivellations sont peu importantes, les doses dues au rayonnement cosmique sont assez uniformes. La dose moyenne est d'environ 0,30 mSv/an. Le rayonnement tellurique provient des radionuclides dans la croûte terrestre et varie selon l'endroit. (dessin V. LENAERTS)

III. RAPPELS DE QUELQUES NOTIONS DE RADIOACTIVITE

A. Lois de désintégration radioactive

La **radioactivité** est une manifestation de **l'instabilité de certains noyaux atomiques**. Contrairement aux propriétés chimiques, c'est une propriété spécifique d'un isotope donné et non d'un élément chimique.

On définit un radioélément par sa probabilité et son type de désintégration.

1. Loi de désintégration :

Sur N atomes, la fraction dN qui se désintègre dans un temps donné dt est une **constante**, caractéristique de la transformation radioactive envisagée. Cette constante radioactive se note λ :

$$dN = -\lambda N \cdot dt$$

λ exprime la **probabilité de désintégration** d'un atome par unité de temps. La solution de l'équation différentielle précédente est une exponentielle à coefficient négatif :

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

N : nombre d'atomes restant au temps t

N_0 : nombre initial d'atomes

λ : constante radioactive spécifique de chaque noyau atomique

2. Demi-vie :

La **période** ou **demi-vie** T est le temps nécessaire pour qu'un nombre donné d'atomes soit réduit de moitié :

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t}$$

D'où l'on tire :

$$T = 0,693/\lambda$$



Fig. 6 – Décroissance d'un corps radioactif. S'il y a à l'origine, N atomes, il n'en n'existe plus que la $\frac{1}{2}$, au bout d'un temps T , $\frac{1}{4}$ au bout de $2T$, etc.

Après 10 périodes, il ne reste plus qu'un millième environ de la quantité initiale d'atomes.

Les périodes sont très variables d'un atome à l'autre, de **10^{11} ans** à **$3 \cdot 10^7$ sec.** environ.

Dans la nature la majorité des éléments radioactifs ont une période relativement longue.

Le tableau suivant donne les périodes de quelques éléments que l'on retrouve dans les filiations des familles radioactives reprises ci-dessous :

Elément	Période
Uranium 235	$7,13 \cdot 10^8$ ans
Uranium 238	$4,49 \cdot 10^9$
Radium 226	1.622 ans
Polonium 210	138 jours
Thorium 232	$1,4 \cdot 10^{10}$ ans

Toutefois on trouve quelques éléments à demi-vie plus courte. Ce sont les descendants des atomes à longue durée.

3. Familles radioactives :

Une **famille radioactive** est une **suite de corps radioactifs** dont chacun est le produit de désintégration du précédent. Dans la nature on trouve les trois familles suivantes :

- la **famille radioactive de l'uranium** (fig. 7), avec comme tête de file l' U^{238} , et comme élément final stable le Pb^{206} ;
- la **famille radioactive du thorium** (fig. 8), avec comme tête de file le Th^{232} , et comme élément final le Pb^{210} ;
- la **famille radioactive de l'actinium** (fig. 9), avec comme tête de file l' U^{235} , et élément final, le Pb^{207} .

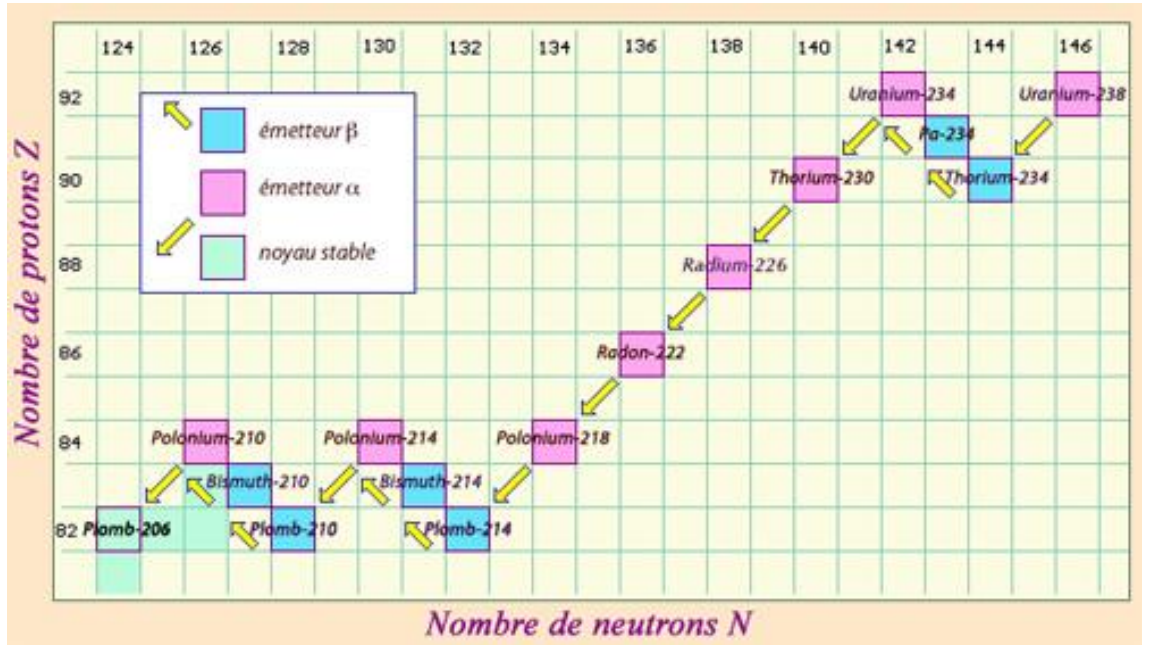


Fig. 7 – Famille de l'²³⁸U

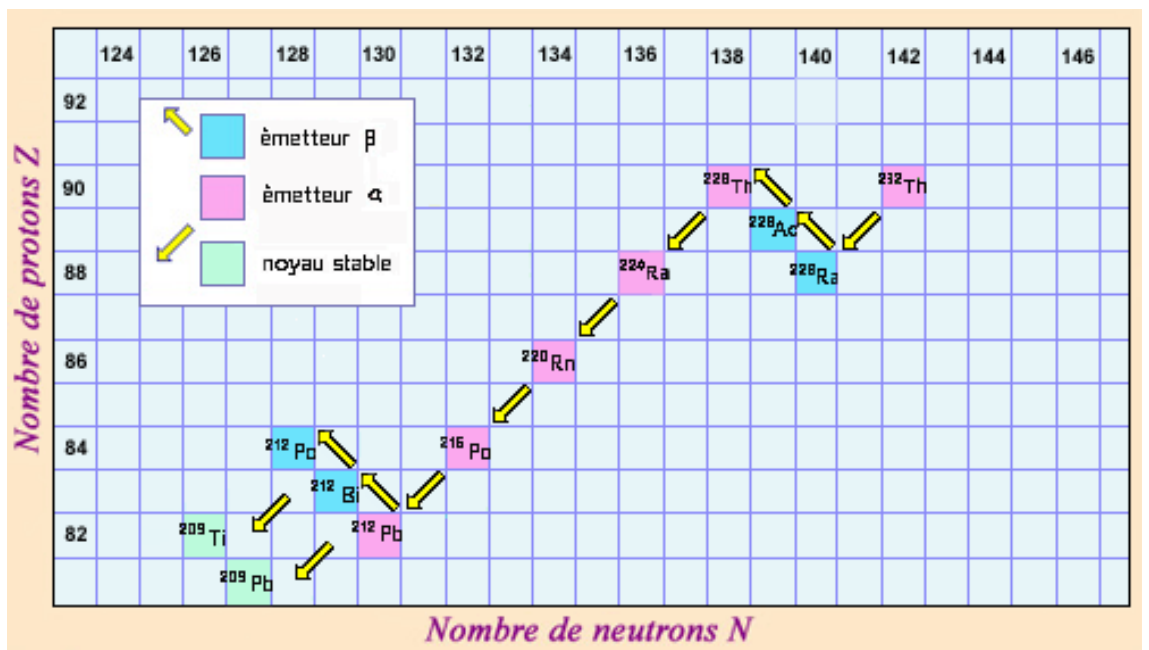


Fig. 8 – Famille du ^{232}Th

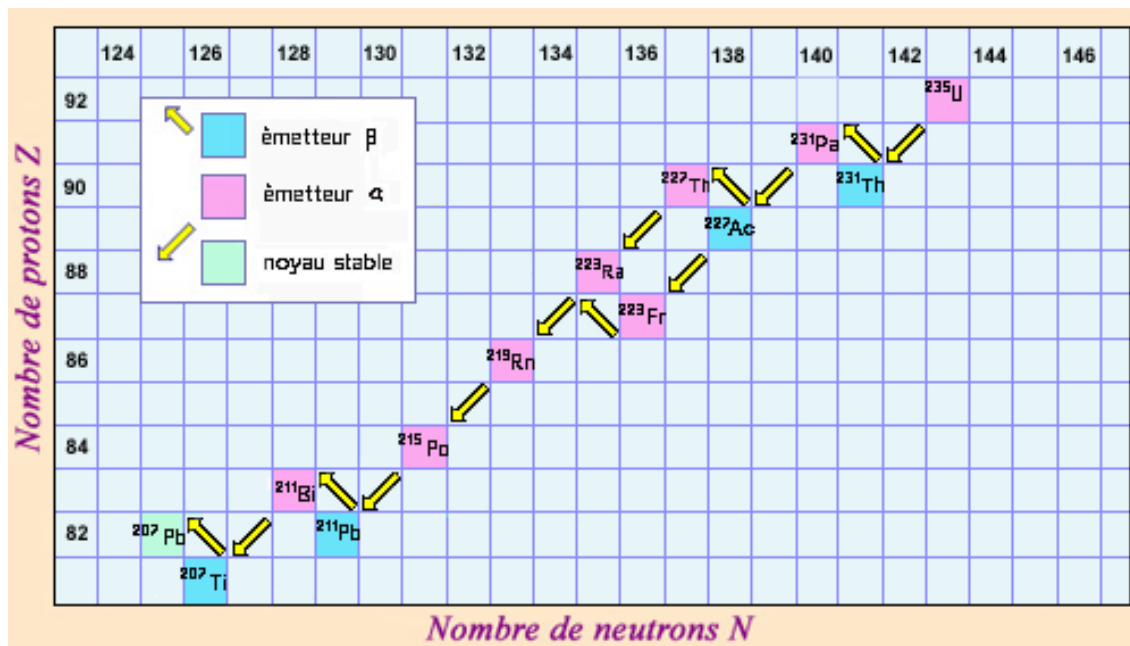


Fig. 9 – Famille de l' ^{227}Ac

4. Equilibre radioactif :

Lorsqu'une espèce radioactive de période T se désintègre, elle se transforme en une autre espèce qui peut être également radioactive avec une période T' , et ainsi de suite jusqu'à l'établissement d'un élément stable. Si la période de l'élément initial est beaucoup plus longue que celles de ses descendants, il s'établit après un certain temps un état **d'équilibre stationnaire**. Dans cet état, chaque atome qui se désintègre est remplacé par son produit de désintégration et ceci en cascade dans une famille radioactive. Tous les membres de la famille semblent se désintégrer à la même vitesse que l'atome initial. Si la période de ce parent est longue, à l'équilibre les quantités de chacun des descendants restent pratiquement constantes. Le nombre d'atomes de chacun est entre ces atomes comme leurs périodes. Seuls, le premier membre de la famille diminue, tandis que le dernier augmente.

Cette notion d'équilibre a une importance majeure dans les applications géologiques comme nous le verrons plus tard.

En d'autres termes, les noyaux d' U^{235} ou U^{238} et du Th^{232} se désintègrent et se transforment par « filiation » en une cascade d'éléments radioactifs. Ces descendants se retrouvent en **équilibre radioactif**, c'est-à-dire que pour chacun d'eux, **il s'en forme autant qu'il s'en désintègre**. C'est ainsi que Pierre et Marie CURIE ont pu identifier le radium et le polonium. Le radon est l'un de ces descendants qui a une part importante dans la radioactivité naturelle. Au bout de plusieurs milliards d'années, l'uranium et le thorium se sont transformés, en fin de chaîne, en noyaux stables de plomb.

B. Types de désintégration nucléaire

1. L'activité d'une source radioactive

Les **radionuclides** se caractérisent par leur **activité propre**. Celle-ci représente le **nombre de désintégrations par seconde** ou le **nombre de rayons émis**. On parle d'activité **alpha** (α), **bêta** (β) ou **gamma** (γ). L'activité ne tient pas compte de l'énergie des rayonnements, ni de l'effet de ceux-ci sur la matière qu'ils traversent. Elle a été longtemps exprimée en **curie** (Ci), unité déterminée par rapport à l'émission du radium considéré comme étalon. **Un curie** correspond à

l'**activité d'un gramme de radium**, soit 37 milliards de désintégration par seconde. On utilisait plus commodément le mCi ou le μCi .

Ensuite, on a adopté le **becquerel (Bq)**, unité plus commode mais trop petite, qui correspond à **une désintégration par seconde**. Les activités exprimées en becquerel prennent des valeurs rapidement fort importantes (fig. 10). Ainsi, le corps humain émet naturellement 8.000 Bq.

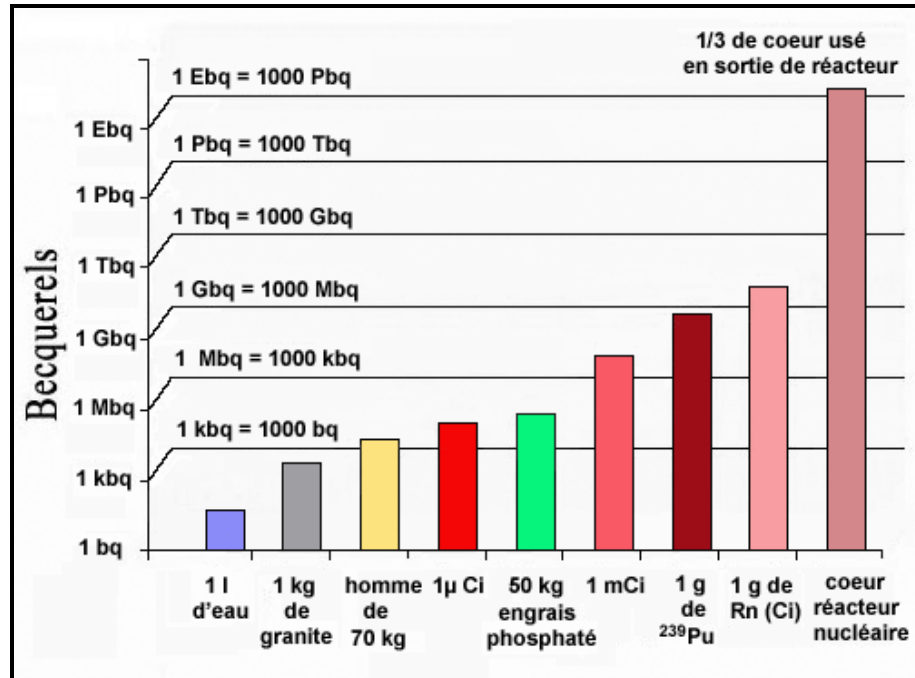


Fig. 10 - Le becquerel : une unité très petite

Le becquerel à l'échelle de l'atome est si petite et si inadaptée pour décrire l'activité de substances radioactives que l'on a recours généralement à des multiples : kilo, méga (million), giga (milliard), terabecquerel (mille milliards), etc. La figure montre à quel point la gamme des activités, allant de celle du litre d'eau à celle du combustible usé d'un réacteur, est étendue. Des unités historiques comme le curie ou le millicurie ont été incluses dans cette gamme. (d'après IN2P3)

2. Unité d'énergie :

L'unité d'énergie habituellement utilisée en physique nucléaire est l'**électronvolt (eV)**. Elle est la conséquence de deux facteurs qui sont d'une part, la relation d'Einstein ($E = mc^2$) établissant une proportionnalité entre masse et énergie, et d'autre part, le rôle fondamentale de la charge électrique élémentaire, véritable unité naturelle, qui est celle de l'électron ou du proton.

Un électronvolt est l'énergie nécessaire pour faire parcourir à un électron la différence de potentiel de 1 volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-12} \text{ erg} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ joule} = 3,828 \cdot 10^{-20} \text{ calorie}$$

On utilise couramment des multiples de l'électronvolt :

- le kilo-électronvolt (keV) = $1 \cdot 10^3 \text{ eV}$
- le méga-électronvolt (MeV) = $1 \cdot 10^6 \text{ eV}$
- le gigaélectron-volt (GeV) = $1 \cdot 10^9 \text{ eV}$

3. Types de radioactivité :

Le noyau d'un élément radioactif peut se transformer spontanément selon certains processus dont les principaux sont :

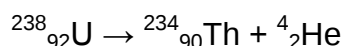
1) Radioactivité α

Constitution :

Les **particules α** émises par un noyau instable sont constituées de **deux protons et de deux neutrons**. Elles correspondent au **noyau d'Hélium** (hélium) et ont donc une **charge (Z) égale à 2 charges élémentaires positives** ; leur **nombre de masse (A)** est **4**.

Considérons un noyau d'uranium $^{238}_{92}\text{U}$ qui comprend 92 protons et $238-92 = 146$ neutrons. L'émission d'une particule α le transforme en un noyau de thorium comportant $92-2 = 90$ protons et $146-2 = 144$ neutrons. Le nombre total de nucléons passe de 238 à $238 - 4 = 234$.

D'où la formule :



Dans cette équation, on peut remarquer qu'il y a **conservation de la charge (92) et du nombre de nucléons (238)** (fig. 11).

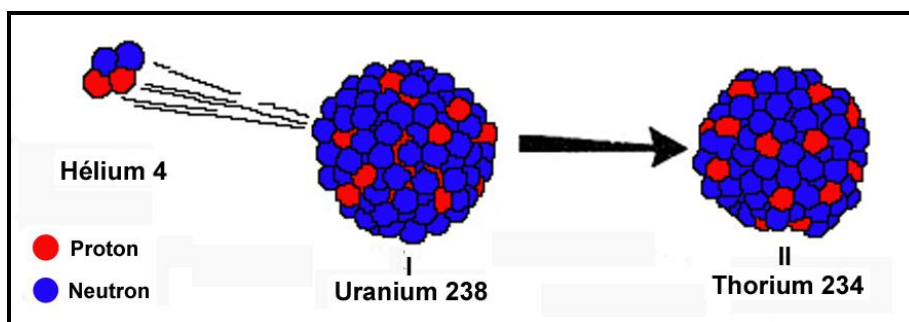


Fig. 11 – Rayonnement alpha

Si l'on soumet ce rayonnement à l'action d'un champ magnétique et d'un champ électrique, il est dévié dans un sens étant donné la **charge positive** des hélions qui le composent.

Spectre d'énergie :

La vitesse d'éjection des α est très variable et dépend de l'émetteur. Elle est comprise entre 14.000 et 25.000 Km/s. Leur énergie varie entre 2 MeV (samarium) et 8,8 MeV (thorium C')

On constate que les émetteurs dont la demi-vie est la plus courte émettent des particules plus énergétiques que les éléments à longue durée de vie.

A titre d'exemple :

Elément	Demi-vie	Energie
U^{238}	4 ½ milliards d'années	4,18 MeV
Sm	1.200 milliards d'années	2 MeV
Th C'	3.10^{-7} sec	8,78 MeV

Parcours :

Les rayons α sont rapidement absorbés par de faibles épaisseurs de matière. Ainsi, dans l'air, le parcours varie de 1,3 cm (samarium) à 8,52 cm (thorium C').

La **loi de Geiger-Nutall** établit une relation entre la constante radioactive d'un émetteur α et l'énergie ou le parcours des rayons α :

$$\text{Log } E = a + b \log \lambda$$

E : énergie de l' α

a : constante identique pour tous les radioéléments

b : constante caractéristiques des éléments d'une même famille.

On admet en première approximation que le parcours d'une particule α dans la matière est proportionnel à son énergie.

Elément	Vitesse (en Km/s)	Energie (en MeV)	Parcours dans l'air (en cm)
U	14.000	4,18	2,72
Ra	15.190	4,79	3,3
RaA	16.250	6,00	4,69
RaC'	19.220	7,68	6,94

Effets :

Les **rayons α** sont des particules **très ionisantes**, c'est-à-dire qu'elles libèrent sur leur passage des paires d'ions dues à l'extraction d'électrons aux atomes de la matière qu'elles traversent. La production d'une paire d'ions absorbe une énergie d'environ 35 eV. Ainsi, un rayonnement α de 3,5 MeV donne environ $3,5 \cdot 10^6 / 35 = 10^5$ paires d'ions. Le pouvoir ionisant d'une particule chargée est mesuré par l'énergie qu'elle perd par unité de longueur dans le milieu qu'elle traverse : le « **transfert linéaire d'énergie** ».

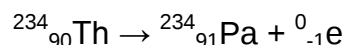
2) Radioactivité β

Constitution

On rencontre **deux types de radioactivité β** , selon que la particule éjectée a une charge négative ou positive :

- **rayonnement β^-** est formé d'électrons émis par le noyau ;
- **rayonnement β^+** se produit avec émission de positron (électron de charge positive).

Prenons un noyau de thorium $^{234}_{90}\text{Th}$ dont le noyau a un excès de neutrons. Il se transforme en protactinium $^{234}_{91}\text{Pa}$ par mutation d'un neutron en proton avec éjection d'un électron $^0_{-1}\text{e}$. D'où la formule :



Dans cette équation, on constate que le **nombre de nucléons** reste **inchangé** (234). Par contre la **charge augmente d'une unité** ($90 \rightarrow 91$) (fig. 12).

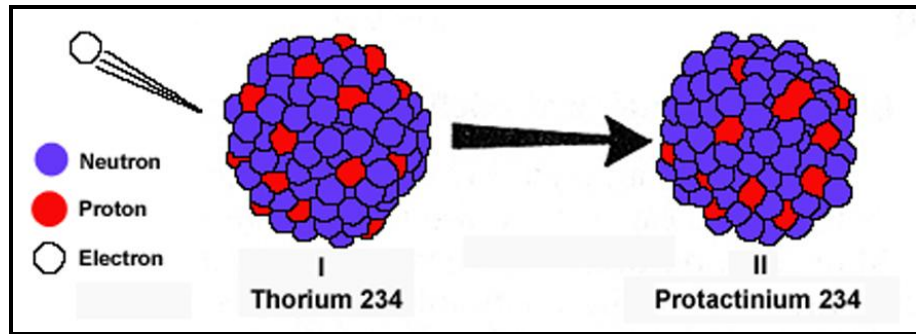


Fig. 12 – Rayonnement β^-

Le même type de réaction se passe lorsque le noyau a un excès de protons, mais dans ce cas, la particule éjectée est un positron et la charge du nouveau noyau a diminué d'une charge.

Ce type de rayonnement est également dévié lorsqu'il est soumis à un champ magnétique. La déviation se fera dans un sens ou dans le sens inverse selon qu'il s'agit de β^- ou β^+ .

Spectre d'énergie

Contrairement aux particules α , les particules β sont émises selon un spectre d'énergie continu allant de 0 à une valeur maximum propre à chaque noyau émetteur, qui correspond au bilan exact d'énergie de la réaction. Dans le reste du spectre énergétique, s'il apparaît un déficit en énergie, celui-ci est compensé par l'émission de neutrinos.

Parcours

Les **rayons β sont plus pénétrants que les particules α** , à énergie égale. Des β de 1 MeV traversent plusieurs mètres d'air et quelques mm dans l'aluminium.

3) Capture K

Dans ce cas, le noyau absorbe un électron extérieur, généralement l'un des deux situé sur la couche K du nuage électronique gravitant autour du noyau. Cette capture se traduit par la **transformation d'un proton en neutron avec émission d'un neutrino** d'une énergie bien déterminée.

Certains noyaux instables peuvent se désintégrer à la fois par capture K et émission β^- . Deux éléments naturels sont dans ce cas : le Potassium 40 (K^{40}) et le Lutécium 176 (Lu^{176}).

4) Radioactivité γ

Constitution

Ce rayonnement est constitué d'**ondes électromagnétiques** analogues à celles de la lumière ou des rayons X. Il s'en différencie par des longueurs d'onde très faibles, de l'ordre de 1/100 d'Å.

La radioactivité γ provient de l'énergie libérée lors du passage d'un noyau à l'état excité vers un niveau inférieur stable du même noyau. Plusieurs étapes peuvent intervenir avant d'arriver à l'état stable fondamental, entraînant l'émission successive de plusieurs photons. C'est ce que l'on appelle une **transition isométrique**. La particule émise est un photon de charge nulle. Ce rayonnement n'est donc pas dévié par un champ magnétique.

Spectre d'énergie

Le principe de la conservation de l'énergie exige que l'énergie du photon soit égale à la différence entre les deux niveaux du noyau. Aussi, chaque photon émis a une énergie caractéristique (W) répondant à la formule :

$$W = h\nu = hc/\lambda$$

Dans laquelle h est une constante égale à $6,6 \cdot 10^{-27}$, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

Parcours

Les rayons γ sont plus pénétrants que les α et les β , et ne sont absorbés que par plusieurs centimètres d'aluminium.

5) Fission

Le phénomène de fission a été largement analysé dans la série d'article sur la radioactivité ¹, aussi nous n'y reviendrons pas.

Cependant il est utile de préciser qu'il peut exister un phénomène de **fission spontanée**, mais avec une probabilité très faible. Ainsi, pour l'U, la constante de désintégration pour la fission spontanée est d'environ $\lambda = 2 \cdot 10^{-24} \text{ sec}^{-1}$; ce qui correspond à une période de 10^{16} ans. Celle de la désintégration α est de $4,5 \cdot 10^9$ ans.

Chaque fission libère une énergie d'environ 200 MeV alors que l' α de l'U²³⁸ est émis avec une énergie de 4,2 MeV.

Etant donné sa faible probabilité cette réaction nucléaire a peu d'impact au niveau géologique.

IV. BIBLIOGRAPHIE

1. CAHEN G., TREILLE P. (1958) – *Précis d'énergie nucléaire*, Dunod, Paris.
2. CAVEDON J.-M. (1996) – *La radioactivité*, Flammarion, coll. « Dominos » N° 103.
3. COPPENS René (1957) – *La radioactivité des roches*, PUF, N° 741.
4. DEWORM J. (1988) – *La radioactivité – L'homme et l'environnement*, CEN/SCK, Mol.
5. HOYAUX M. (1953) – *L'atome et ses applications*, Ed. « Science et Technique », Bruxelles.
6. PICCIOTTO E.-E. (1950) – *Les phénomènes radioactifs en géologie*, in ? pp. 102-135.
7. SIX R. – Dans les pas des alchimistes !, in Bulletin du G.E.S.T., N° 117, janv. 2003.
8. http://fr.wikipedia.org/wiki/Vladimir_Vernadsky
9. [http://fr.wikipedia.org/wiki/Victor_Goldschmidt_\(chimiste\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Victor_Goldschmidt_(chimiste))
10. www.edunet.tn/edutic/modules/applets/appphysique/famille.htm -

(voir la suite au Dossier nucléaire XXX : Le tableau périodique des éléments)

¹ R. SIX – *Découverte de la fission nucléaire*, in Bulletin du G.E.S.T., n° 129, janv. 2005, et *Fission nucléaire et réaction en chaîne*, in Bulletin du G.E.S.T., n° 130, mars 2005.

**Les surprises de la
radioactivité naturelle
provoquant des
mutations favorables
dans un nouvel
environnement**

