

Radioactivité et décroissance radioactive

Un thème de physique nucléaire

Mise à jour 29 juillet 2025

DANS LES PROGRAMMES de spécialité physique-chimie et d'enseignement scientifique en vigueur dans le cycle terminal des lycées, la physique nucléaire tient une place non négligeable et est présente dans les thèmes suivants : l'aspect historique de la découverte de la radioactivité, l'importance des réactions nucléaires dans la nucléosynthèse au sein de l'Univers en enseignement de spécialité de première, l'aspect énergétique dans le cas des réactions de fission et de fusion nucléaires en enseignement scientifique de première, mais surtout de terminale. La loi de décroissance radioactive comme exemple d'évolution d'un système siège d'une transformation nucléaire. Identifier les différents types de désintégration nucléaire, savoir ce que désigne l'activité d'un échantillon radioactif, sa demi-vie, comprendre puis modéliser mathématiquement la loi de décroissance radioactive sont quelques-unes des compétences attendues pour cette partie des programmes, présentée en enseignement scientifique en première puis axiomatisée en enseignement de spécialité de terminale. Quelques applications sont évoquées comme la datation, la médecine et la radioprotection.

1. LA PHYSIQUE NUCLÉAIRE : QUELQUES SITES INSTITUTIONNELS

1.1. Éduscol et Édubase

De nombreux documents d'accompagnement ont jalonné l'enseignement de la physique nucléaire en lycée pour les différentes réformes qui ont marqué notre discipline. On les trouve encore dans de nombreux sites disciplinaires académiques. Pour l'enseignement scientifique, le [portail Éduscol](#) rappelle les compétences attendues.



VOIE GÉNÉRALE

2^{NE} 1^{RE} T^{LE}

Enseignement scientifique

ENSEIGNEMENT COMMUN

L'ESSENTIEL SUR LES RÉACTIONS NUCLÉAIRES : FUSION, FISSION, NUCLÉOSYNTHESE STELLAIRE

Ce document fait le point sur quelques notions qui permettent de comprendre la formation des éléments chimiques qui constituent notre Univers ainsi que l'origine du rayonnement solaire. Les principales étapes de la nucléosynthèse, du Big Bang à la nucléosynthèse stellaire sont abordées.

Mots-clés
Fusion, fission, nucléosynthèse, énergie de liaison, réaction nucléaire stellaire, éléments chimiques, équivalence masse-énergie

Compétences du programme
1.1 Un niveau d'organisation : les éléments chimiques.

Savoirs
Les noyaux des atomes de la centaine d'éléments chimiques stables résultent de réactions nucléaires qui se produisent au sein des étoiles à partir de l'hydrogène initial.

Savoir-faire
Produire et analyser différentes représentations graphiques de l'abondance des éléments chimiques (proportions) dans l'Univers, la Terre, les êtres vivants.
L'équation d'une réaction nucléaire stellaire étant fournie, reconnaître si celle-ci relève d'une fusion ou d'une fission.

2.1 Le rayonnement solaire.

LES MATHÉMATIQUES DE L'ENSEIGNEMENT SCIENTIFIQUE LA DÉSINTÉGRATION RADIOACTIVE

Mots-clés
Décroissance radioactive ; demi-vie ; datation.

Références au programme
Aborder la question de la diversité des éléments chimiques nécessite de s'intéresser aux noyaux atomiques et à leurs transformations. Cela fournit l'occasion d'introduire un modèle mathématique d'évolution discrète.

Savoirs
Certains noyaux sont instables et se désintègrent (radioactivité).
L'instant de désintégration d'un noyau radioactif individuel est aléatoire.
La demi-vie d'un noyau radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux initialement présents dans un échantillon macroscopique se soit désintégrée. Cette demi-vie est caractéristique du noyau radioactif.

Savoir-faire
Calculer le nombre de noyaux restants au bout de n demi-vies.
Estimer la durée nécessaire pour obtenir une certaine proportion de noyaux restants.
Utiliser une représentation graphique pour déterminer une demi-vie.
Utiliser une décroissance radioactive pour une datation (exemple du carbone 14).

Notions mathématiques mobilisées
Proportions, pourcentages, puissances.
Notation scientifique.
Modèle discret de décroissance exponentielle. Approche du modèle continu.
Lecture graphique et interprétation.
Algorithmique et programmation.

Figure 1 - La physique nucléaire en enseignement scientifique de première suivant Éduscol.

La loi de décroissance radioactive est abordée et en enseignement scientifique de première et en enseignement de spécialité de terminale, pour lesquels on mobilise les outils mathématiques adéquats.

Le **portail Édubase** recense les documents d'accompagnement et autres ressources qui viennent en complément des attendus des programmes.

Radioactivité
https://www.ac-paris.fr/journal/formation/20130711/radioactivite?cid=p1_4876796:portal-rlap...
 Radioactivité Continuité pédagogique Physique
 CRÉE LE 2020-03-19 MODIFIÉ LE 2020-07-30 ACADÉMIE OU ORGANISATION Paris DISCIPLINE Physique / Chimie NIVEAU ÉDUCATIF terminale technologique, terminale STI2D
 DOMAINE D'ENSEIGNEMENT physique-chimie (enseignement commun), physique-chimie (enseignement de spécialité)
 Dans le cadre de la continuité pédagogique, une proposition pour faire travailler les élèves de terminales STI2D sur la radioactivité.
 Objectifs :
 Distinguer la radioactivité naturelle de la radioactivité artificielle.
 Citer les différents types de rayonnement radioactif et préciser la nature des particules émises. Citer la définition de l'activité d'une source radioactive et indiquer son unité. Exploiter la définition de la demi-vie d'une espèce radioactive. Comparer la décroissance radioact...

Simulation de la radioactivité
<http://sciences-physiques.ac-dijon.fr/documents/lycee/simulations/terradioactivite/radioact...>
 CRÉE LE 2008-01-05 MODIFIÉ LE 2008-01-05 ACADÉMIE OU ORGANISATION Dijon DISCIPLINE Physique / Chimie
 Travaux pratiques en classe de TS avec mise en évidence de la décroissance radioactive à l'aide de la calculatrice et de dés.

La découverte de la radioactivité et le calcul de l'âge de la Terre
<https://svt.ac-versailles.fr/tpsp/chu?article1128>
 Continuité pédagogique CRCN communication et collaboration CRCN création de contenus CRCN environnement numérique CRCN informations et données
 CRÉE LE 2021-01-03 MODIFIÉ LE 2021-01-03 ACADÉMIE OU ORGANISATION Versailles DISCIPLINE Sciences de la vie et de la Terre NIVEAU ÉDUCATIF lycée général et technologique, 1re générale et technologique, 1re générale
 DOMAINE D'ENSEIGNEMENT enseignement scientifique (enseignement commun) THÈME DE PROGRAMME La Terre, un astre singulier, l'histoire de l'âge de la Terre
 Produire une représentation graphique à partir d'un traitement de données numériques et interpréter ces données physiques et mathématiques pour avoir des arguments permettant d'aboutir à la connaissance actuelle de l'âge de la Terre.

Figure 2 - Ressources recensées par Édubase sur la radioactivité.

1.2. Un projet pluridisciplinaire : le site **laradioactivite.com**

Ce site est très étoffé (cf. figure 3, page ci-contre) et aborde tous les domaines de la physique nucléaire qui peuvent intéresser professeurs et élèves à un niveau tout à fait adapté au lecteur non averti, mais curieux des faits scientifiques.

2. HISTORIQUE

2.1. La découverte de la radioactivité : l'expérience retrouvée des Curie

Les rayons uraniques, découverts en 1896 par Henri Becquerel, posaient une énigme : les composés d'uranium semblaient en effet conserver intacte, sur une durée de plusieurs mois, leur capacité à noircir une plaque photographique. Où puisaient-ils leur énergie ? Le physicien Pierre Curie persuada Marie (Manya) Skłodowska, son épouse depuis 1895, de faire de ce phénomène extraordinaire son sujet de thèse. *«L'étude du phénomène nous parut très attrayante, et cela d'autant plus que la question, entièrement nouvelle, ne comportait aucune bibliographie. Je me décidai à entreprendre un travail sur ce sujet»*.

Henri Becquerel avait aussi montré que les «rayons uraniques» rendaient l'air



Figure 3 - Le site [laradioactivite.com](http://www.laradioactivite.com) est mis à jour par l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules (IN2P3).

conducteur de l'électricité : cette propriété pouvait faire l'objet de mesures quantitatives.

À cette fin, Pierre Curie, un des pères de la piézoélectricité, réalise une véritable chaîne de mesures : la substance radioactive, pulvérisée, ionise un volume d'air entre les plaques d'un condensateur. La charge piégée par le condensateur est transférée vers un dispositif appelé électromètre. Un des plateaux de cet appareil ainsi chargé est alors mis en mouvement : il est remis dans sa position initiale par un actionneur piézoélectrique à quartz qui permet d'étalonner l'électromètre avec une grande précision.

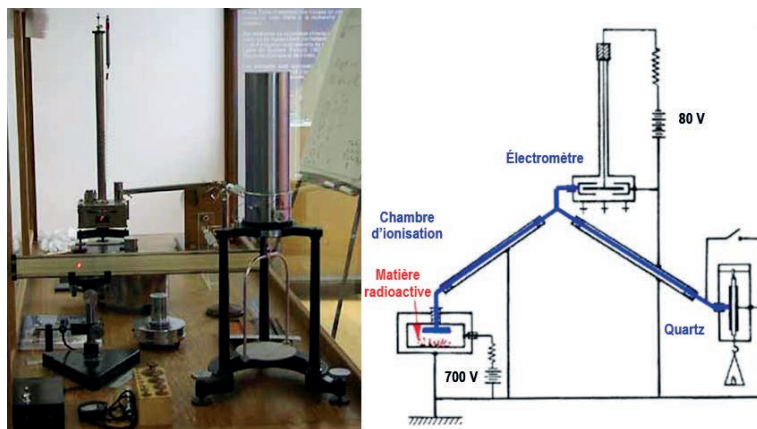


Figure 4 - L'expérience des Curie : chambre radioactive, quartz et électromètre.

Marie Curie signale en avril 1898 : «*J'ai cherché si des corps autres que les composés de l'uranium étaient susceptibles de rendre l'air conducteur de l'électricité*». Elle testa alors tous les échantillons présents à l'École supérieure de physique et de chimie industrielles (ESPCI) de la Ville de Paris, en mesurant leur activité comparativement à celle de l'uranium métallique. Elle trouva que tous les composés contenant de l'uranium étaient actifs et que la pechblende, principal minerai d'uranium était même plus actif que l'uranium métallique. Marie Curie nota : «*ce fait est très remarquable et porte à croire que ces minéraux peuvent contenir un élément beaucoup plus actif que l'uranium*».

De fait, en l'espace de huit mois, Marie Curie isola, à partir de la pechblende, deux nouveaux éléments chimiques, le polonium et le radium, et elle donna naissance à un nouveau domaine scientifique, qu'elle appela «radioactivité».

Cet instrument à la base des travaux menés par les Curie a été exhumé et remis en état de fonctionnement. Soraya Boudia, qui travaille au CRHST (Centre de recherche en histoire des sciences et des techniques), a cherché à reproduire les mesures que réalisait Marie Curie pour étalonner les sources radioactives. L'historienne a reconstitué la chaîne de mesure en utilisant des instruments du Musée Curie, remis en état pour l'occasion. Un **film** *L'expérience retrouvée* a été réalisé.

2.2. Portraits de physiciennes du nucléaire

- ◆ Marie Curie : les hommages sont très nombreux, en voici un dans un **petit film** monté par le CEA (Commissariat à l'énergie atomique).

Marie Curie «La chimie de l'impondérable»

La découverte du polonium par Marie Curie en 1911.

Dans ce film sont retracées la découverte du polonium et du radium puis la tentative menée peu après pour extraire du polonium à partir d'un prélèvement d'un gramme de pechblende qui contient 60 % d'oxyde d'uranium.

- ◆ Irène Joliot-Curie : encore une figure emblématique, que l'on associe à son mari Frédéric Joliot-Curie, célèbres pour leurs travaux sur la radioactivité provoquée. On attribue à Irène cette réflexion : «*Sans l'amour de la recherche, le savoir et l'intelligence ne*

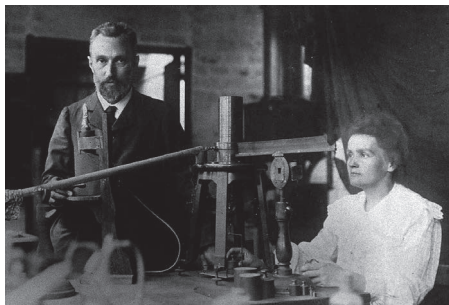


Figure 5 -  Pierre et Marie Curie vers 1906 -  Irène et Frédéric Joliot-Curie en 1935.

peuvent vraiment faire un savant ». Lire **son portrait** sur le site du ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation.

- ◆ **Lise Meitner**, physicienne autrichienne pour sa découverte de la fission de l'uranium, conjointement avec Otto Hahn et le chimiste Fritz Strassmann. On ne lui attribua pas le prix Nobel, car d'une part elle fut exclue de la communauté scientifique par les nazis du fait de ses origines juives et d'autre part elle fut victime d'une certaine misogynie du comité Nobel de l'époque.
- ◆ **Chien-Shiung Wu**, physicienne du nucléaire qui étudia la désintégration bêta et qui joua un rôle important au sein de l'équipe du projet Manhattan qui déboucha sur la première bombe atomique.

[A]



[B]



Figure 6 - [A] Chien-Shiung Wu dans son laboratoire en 1963 -
[B] Otto Hahn et Lise Meitner en 1938.

3. NUCLÉOSYNTÈSE

« Nucléosynthèse » est le terme utilisé pour désigner les processus de synthèse des éléments chimiques dans l'Univers. Il existe principalement deux types de nucléosynthèses : la nucléosynthèse primordiale et la nucléosynthèse stellaire.

3.1. La nucléosynthèse primordiale

La synthèse des éléments chimiques se produisant quelques minutes après le Big Bang, il y a 13,8 milliards d'années, est appelée « nucléosynthèse primordiale ». Les calculs et les observations, en particulier les mesures des abondances des éléments chimiques sur de vieilles étoiles de plus de 12 milliards d'années, montrent que l'Univers à sa naissance était composé essentiellement d'atomes d'hydrogène (dont le noyau contient un proton) et d'hélium (dont le noyau contient deux protons). Il y avait approximativement 75 % en masse d'hydrogène et 25 % d'hélium. Cet accord entre théorie et observation constitue une des preuves en faveur du modèle du Big Bang. Il n'y avait donc pas d'autres éléments chimiques, pas d'oxygène par exemple, juste de l'hydrogène, de l'hélium et quelques traces d'éléments chimiques très légers

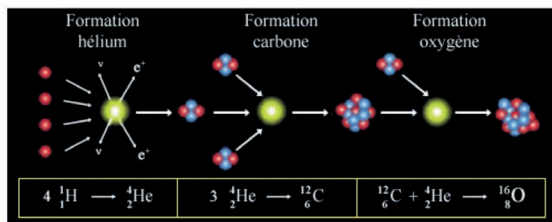
(lithium, béryllium). Aujourd'hui, les recherches sur la nucléosynthèse primordiale se concentrent sur l'énigme de l'abondance du lithium 7, voir par exemple [les travaux du Groupe d'Astrophysique nucléaire](#) du GANIL (Grand accélérateur national d'ions lourds). Pour [le problème du lithium cosmologique](#), le site du CEA propose un site intéressant. La théorie de la nucléosynthèse du Big Bang, qui décrit la production des noyaux les plus légers, hydrogène, hélium et lithium, pendant les phases primordiales de l'Univers, prédit les abondances de ces noyaux. Pour l'hydrogène et l'hélium, ces prédictions sont en parfait accord avec les observations dans certaines étoiles reflétant la composition chimique primordiale. Par contre pour le lithium l'observation est environ trois fois plus faible, ce qui est appelé le problème du lithium cosmologique. Dans le modèle de nucléosynthèse, l'abondance de ${}^7\text{Li}$ dépend pour l'essentiel de la présence de ${}^7\text{Be}$, qui, par capture d'électron, devient ${}^7\text{Li}$. Afin d'expliquer cet écart, une des pistes à explorer est le détail de l'enchaînement des réactions nucléaires et leurs sections efficaces nécessaires pour modéliser l'abondance de ${}^7\text{Li}$.

3.2. La nucléosynthèse stellaire

Mécanismes de fabrication des noyaux atomiques

Les noyaux des atomes qui constituent notre quotidien se sont formés pour la plupart dans la fournaise des étoiles, et pour le reste lors de violents cataclysmes stellaires.

Les étoiles se forment à partir d'un nuage de matière composé principalement d'hydrogène, mais aussi d'hélium. Il est issu de la **nucléosynthèse primordiale** qui s'est produite au début de l'univers. Ce nuage se contracte sous l'effet de l'attraction due à la gravitation. L'effondrement gravitationnel du nuage (appelé proto-solaire) chauffe le milieu jusqu'à ce que les premières réactions de fusion puissent « s'allumer ».



Synthèse des noyaux légers

Dans le Soleil, l'hélium est produit (en simplifiant) par la fusion de 4 noyaux d'hydrogène. C'est l'énergie libérée par ces réactions de fusion qui nous fournit principalement chaleur et lumière. Les étoiles synthétisent également d'autres éléments. Par des réactions de fusion de noyaux légers, il se forme des éléments de plus en plus lourds jusqu'au fer. Ensuite la fusion s'arrête, car la formation de noyaux plus lourds nécessiterait des apports externes d'énergie.

©IN2P3

La première de ces réactions est celle de la fusion de deux protons qui conduit à formation d'un noyau de deutérium composé d'un proton et d'un neutron. Cette réaction – appelée **réaction pp1** – est la principale, celle qui produit le plus d'énergie dans le soleil. Cette première fusion (c.f. page précédente) est suivie d'autres qui conduisent à la formation d'hélium. Cet hélium s'ajoute à ce qui reste de l'hélium de la nucléosynthèse primordiale. Puis à partir de l'hélium, d'autres noyaux légers sont formés, dont notamment le carbone et l'oxygène.

Figure 7 - Nucléosynthèse stellaire.

Aujourd'hui, on trouve sur Terre plus de deux cent cinquante sortes d'atomes différents dont le noyau contient un nombre de protons inférieur à 92 et un nombre de neutrons inférieur à 146. Un second processus de synthèse des éléments chimiques a nécessairement suivi la nucléosynthèse primordiale. Un processus appelé « nucléosynthèse stellaire » est en fait constamment à l'œuvre partout dans l'Univers et on lui doit

en particulier l'émergence de la vie dans notre système solaire (vieux de 4,6 milliards d'années seulement) grâce à la synthèse d'éléments chimiques tels que l'oxygène, le carbone ou encore l'azote. Ainsi fonctionne le soleil depuis 4,5 milliards d'années et pour encore à peu près le même temps. Ces réactions de fusion libèrent de l'énergie, dont une partie rayonne sous forme de lumière et de chaleur. La pression de ces rayonnements empêche l'étoile de se contracter davantage [...]. Lorsque le combustible hydrogène est épuisé, plus rien ne s'oppose à un nouvel effondrement gravitationnel. La température va s'élever encore plus jusqu'à ce que s'allume la réaction suivante et ainsi de suite jusqu'à la production de fer (^{56}Fe), au voisinage immédiat du nickel (^{62}Ni), le nucléide qui possède la plus grande stabilité. Les réactions de fusion ultimes qui aboutissent au fer ne peuvent se produire qu'au cœur d'étoiles beaucoup plus grosses que le soleil. [...] Au-delà du fer, la nature a recours à un autre mécanisme pour synthétiser les noyaux les plus lourds – or, argent, plomb, uranium – que nous connaissons. Ce mécanisme survient lors de la dernière étape de la vie de très grosses étoiles, qui se termine par une explosion. L'étoile devient très brillante : une supernova.

3.3. Nucléosynthèse : vu sur Internet en anglais

- ◆ **The Physics Hypertextbook** : ce site est exhaustif sur le sujet, avec des diagrammes très bien construits pour suivre les nucléosynthèses stellaires en prenant en compte la masse de l'étoile. Une abondante bibliographie complète les informations présentes sur ce sujet.
- ◆ **ThoughtCo** : ce site américain, construit à la manière d'un blog, est explicitement destiné aux élèves et professeurs.
« ThoughtCo est un site de référence de premier plan axé sur plus de vingt ans sur le contenu éducatif créé par des experts. En 2018, ThoughtCo a reçu un Communicator Award dans la catégorie General Education et un Davey Award dans la catégorie Education ».
- ◆ **Herschel Space Observatory** : un classique du genre, bâti un peu comme notre site du CEA.

4. DÉCROISSANCE RADIOACTIVE ET APPLICATIONS

4.1. La loi de décroissance

Un noyau radioactif est un noyau instable subissant spontanément une transformation appelée désintégration permettant un retour à la stabilité. Il ne « vieillit » donc pas puisqu'il se transforme sans subir de modifications progressives. Cela signifie qu'un noyau radioactif créé il y a dix ans a autant de chance de se désintégrer à cet instant qu'un noyau identique venant d'être créé.

Pour un noyau donné, le phénomène de désintégration est donc aléatoire et imprévisible. Par contre, l'évolution statistique d'une population de noyaux répond à une loi de probabilité bien déterminée. Il est alors fait mention de la célèbre loi de

décroissance exponentielle, qui fait partie du programme d'enseignement de spécialité de terminale :

$$N(t) = N(0) \cdot e^{-\lambda t},$$

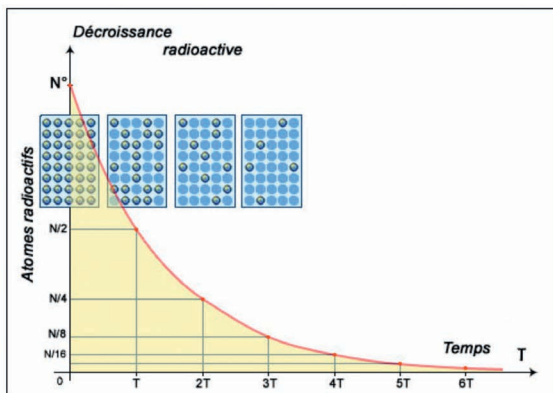
si $N(0)$ est le nombre de noyaux radioactifs à l'instant initial $t_0 = 0$, $N(t)$ étant le nombre de noyaux restants au bout d'une durée $\Delta t = t - t_0$; λ est la « constante radioactive » qui qualifie le radionucléide étudié. Le site de l'Institut français de l'éducation (IFÉ) contient un article intéressant sur la **décroissance radioactive**.

Le site « laradioactivite.com » présente un aperçu bien documenté sur la loi de **décroissance radioactive**, telle qu'on la présente en enseignement scientifique de première, avec la notion de « demi-vie ».

Il est rappelé dans ce site que : « Du fait de la **décroissance naturelle** de la radioactivité naturelle, la radioactivité d'un échantillon radioactif diminue avec le temps. Cette décroissance est effective, mais lente. Selon une étude de l'autorité de sûreté finlandaise, un combustible usé sorti du réacteur est quatre millions de fois plus radioactif que l'uranium naturel qui a servi à le fabriquer. Un an après, il ne l'est plus que soixante mille fois. Après cinq cents ans, il l'est encore cent fois. Il faudra environ deux cent mille ans pour que la radioactivité de ce réacteur retrouve le niveau de l'uranium naturel. Si cette diminution est spectaculaire quand l'on compte en siècles ou

La décroissance radioactive : une loi fondamentale

La loi de décroissance radioactive est une loi fondamentale de la radioactivité. Quand un noyau émet une particule alpha ou un électron bêta, il se transforme : c'est ainsi que du radium devient du radon, du tritium de l'hélium ! De ce fait, le nombre d'atomes de l'espèce radioactive diminue inexorablement. Il en va de même du nombre de désintégrations par seconde, que l'on appelle **activité** de la source radioactive, et du nombre de rayonnements émis. Nombre d'atomes radioactifs, nombre de désintégrations, nombre de rayonnements émis marchent de concert. Ils décroissent de la même façon !



Demi-Vie

Le nombre de noyaux d'un échantillon radioactif diminue de moitié au bout d'un temps caractéristique appelé « période radioactive ». Cette division par deux ne dépend pas de l'âge des noyaux. Au bout de deux périodes, le nombre de noyaux est divisé par quatre, au bout de trois périodes par huit, etc... Cette loi de décroissance en fonction du temps est dite exponentielle. La période est, avec la nature des rayonnements émis, la principale caractéristique d'un élément radioactif.

©IN2FP3

La décroissance est simple quand le noyau retrouve la stabilité après avoir émis son rayonnement : une décroissance qui ressemblerait à celle d'un placement qui perdrait chaque année quelques pourcents de sa valeur ! La population des radioéléments décroît selon une loi appelée **exponentielle**. Cette population est divisée par deux, chaque fois qu'un laps de temps caractéristique de l'espèce radioactive, appelé **période** ou encore **demi-vie** s'écoule. La période radioactive, qui mesure la rapidité de la décroissance, est une caractéristique du noyau.

Figure 8 - **Décroissance radioactive**.

en millénaires, elle est bien trop lente pour les humains ! Étant donné que l'activité initiale est très élevée, il faudra attendre longtemps pour que le risque devienne négligeable. L'évolution est rendue complexe par la variété des éléments radioactifs contenus. Chacun décroît avec sa propre période pour donner des descendants qui sont parfois eux-mêmes radioactifs ».

4.2. Les différents types de radioactivité spontanée

Les noyaux radioactifs émettent trois sortes de rayonnements appelés par les physiciens **alpha**, **bêta** et **gamma**, les trois premières lettres de l'alphabet grec. La découverte de « rayons » d'origine inconnue émis par des sels d'uranium faisait suite en 1896 à celles d'autres rayons dont on n'avait pas encore élucidé la nature : les rayons X et les rayons cathodiques. Il faudra longtemps pour comprendre l'origine des uns et des autres.

Les désintégrations alpha, bêta, et gamma font intervenir les forces fortes, faibles et électromagnétiques présentes dans le noyau : le noyau évolue vers un état plus stable en émettant un rayonnement. Les deux principales causes d'instabilité sont un trop grand nombre de nucléons ou un déséquilibre entre les nombres de protons et de neutrons.

Dans le premier cas de la radioactivité alpha, le noyau recherche la stabilité en émettant un noyau d'hélium, ou particule alpha. Dans le second cas, un neutron se transforme en un proton (ou l'inverse), avec émission d'un électron (ou un positon) : c'est la radioactivité bêta.

La radioactivité gamma est une simple désexcitation du noyau, de même nature que l'émission de lumière ou de rayons X par les atomes. Les désintégrations gamma sont généralement instantanées et suivent de très près l'émission de particules alpha ou bêta. En effet, ces émissions laissent presque toujours le noyau dans un état excité.

4.3. Datation radioactive

Une des applications fondamentales de la décroissance radioactive est celle qui porte sur les méthodes de datation, dans des échelles de temps très différentes :

- ◆ pour des durées géologiques, partie de la géophysique que l'on traite en enseignement scientifique de première ;
- ◆ pour des datations de type archéologique, problématique que l'on retrouve dans l'enseignement de spécialité de terminale où l'on utilise la modélisation mathématique de la décroissance exponentielle.

Internet est très riche en ressources pour ces deux types de datations.

4.3.1. Datation en géologie

Citons les **ressources en ligne de l'ENS Lyon**, pour la qualité de l'information donnée.



GÉOSCIENCES

Vous êtes ici : Accueil / Thématiques / Géosciences / Temps géologiques / datation isotopique / comprendre / Principe de la méthode de datation par chaînes radioactives

PRINCIPE DE LA MÉTHODE DE DATATION PAR CHAÎNES RADIOACTIVES

Par ftrouillet — Dernière modification 19/09/2017 09:50

Principe de la datation

- L'élément uranium possède deux isotopes radioactifs à longue vie : l'uranium 235 et l'uranium 238. Chaque isotope se désintègre par étapes successives et est à l'origine de familles radioactives dont le dernier isotope stable est un isotope du plomb. Ainsi ^{235}U donne ^{207}Pb et ^{238}U donne ^{206}Pb .

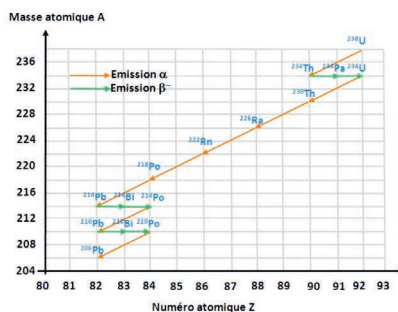


Figure 9 - Les chaînes naturelles de désintégrations radioactives.

Lire ensuite : « Pour dater des matériaux géologiques très anciens, on a recours à des radioéléments dont la période est comprise entre quelques centaines de millions d'années et quelques milliards d'années. La décroissance de ces éléments, dont le plus connu est l'uranium-238, joue le rôle de chronomètre. Outre les uranium-235 et 238, ces éléments naturels à vie très longue (voisine ou excédant le milliard d'années) sont le potassium-40, le rubidium-87, le samarium-147, le lutétium-176, le rhénium-187 et le thorium-232 ».

Certains rapports isotopiques issus de ces filiations fournissent donc de véritables horloges pour dater les couches géologiques. Citons le rapport Rubidium (87 Ru) / Strontium (86 Sr). **Consulter le site PlanetTerre.**

4.3.2. La datation au carbone 14

« La plus connue des techniques de datation est la datation au carbone-14. Le carbone-14 est un isotope radioactif du carbone présent en infime quantité dans l'atmosphère. Les végétaux et les animaux assimilent en permanence du gaz carbonique formé à partir de cet isotope de la même façon qu'ils absorbent le gaz carbonique formé à partir du carbone ordinaire ou carbone-12. Le

carbone-14 est constamment renouvelé. Il a pour origine des particules cosmiques provenant principalement du soleil. Ces particules, quand elles pénètrent dans la haute atmosphère, brisent les noyaux qu'elles rencontrent. Dans la collision, des neutrons sont libérés. Ces neutrons rencontrent à leur tour un noyau d'azote de l'air. Ils s'introduisent dans ce noyau, provoquant l'expulsion d'un proton et une transmutation en carbone-14.

Il est naturel de supposer que le bombardement cosmique responsable de cette formation est constant à l'échelle de quelques milliers d'années. Ce bombardement dépend principalement de deux facteurs qui varient très lentement, l'activité solaire et le champ magnétique terrestre. Le champ magnétique terrestre sert de bouclier contre le rayonnement cosmique. Quand sa valeur diminue, le bombardement cosmique augmente et avec lui la formation de carbone-14.

Tout être vivant assimile du gaz carbonique, dont une petite fraction contenant du carbone-14. Cette assimilation cesse à la mort de l'organisme. Le stock de carbone-14 est figé. Quand bien plus tard, un archéologue en examine les vestiges (cendres de foyer, os, restes de végétaux), le nombre de noyaux de carbone-14 a décliné selon une loi exponentielle de période 5700 ans. L'archéologue date le fossile en comparant la fraction de noyaux de carbone-14 subsistant à la fraction existante au moment où l'échantillon s'est « fermé » aux échanges avec l'extérieur.

L'hypothèse la plus simple est que la teneur de radioélément au moment de la « fermeture » est la même que celle mesurée sur un échantillon de carbone prélevé sur une plante actuelle. La comparaison des activités en carbone-14 du fossile et du composé végétal actuel donne l'âge. Le calcul suppose que le taux de formation du carbone-14 atmosphérique n'a pas varié par rapport au moment où le fossile vivait. Ceci n'est pas tout à fait vrai et il est nécessaire de recalculer dans le temps et d'effectuer des corrections ». **Ce texte est extrait du site laradioactivite.com.**

5. FISSION ET FUSION NUCLÉAIRES

C'est le programme d'enseignement scientifique de terminale qui invoque fission et fusion contrôlée, selon la problématique : « les enjeux de l'utilisation de l'énergie nucléaire : de la fission à la fusion contrôlée ». Un vaste sujet ! Pour se documenter de façon satisfaisante, le site laradioactivite.com propose :

- ◆ [fission nucléaire](#) ;
- ◆ [fusion nucléaire](#).

Ce thème est hautement polémique dès que l'on aborde les questions dites de « transitions énergétiques ». De nombreux sites, dont l'argumentation est plus ou moins partielle, peuvent être consultés sur ce sujet. Le lecteur en trouvera de variés. Certains sont bien documentés, très connus avec des choix partisans. Un professeur ne peut ignorer certains d'entre eux par leurs notoriétés et fréquentations :

- ◆ [pour les inconditionnels](#) de l'énergie nucléaire ;
- ◆ [pour ses détracteurs](#).

Dans ce domaine, comme beaucoup d'autres, il est difficile de démêler ce qui relève du «savoir scientifique» d'un débat idéologique qui prend appui sur la science, souvent invoquée alors sous le terme de «techno science». Comment un professeur de sciences physiques peut-il jongler avec autant d'informations qui souvent s'appuient sur des croyances qui ne sont pas liées à des démarches scientifiques, même si c'est un «expert» des sciences qui est consulté ? Ce qui est sûr, c'est qu'il ne peut ignorer ces nouveaux canaux d'informations que sont blogs et réseaux sociaux.

6. VU DANS LE BUP : RADIOACTIVITÉ

Dans cette rubrique, nous citons quelques articles du *Bup* qui apportent un éclairage utile sur l'historique de la découverte de la radioactivité, sur la loi de la décroissance radioactive et sur quelques méthodes de datation. Il est à noter que, curieusement, le sujet qui se rapporte à la radioactivité n'est pas actuellement le plus prisé dans notre revue : la plupart des articles les plus intéressants pour cette fiche datent de dix à vingt ans pour la plupart, mais demeurent encore totalement en phase avec les prérequis des programmes actuels de lycée. Chaque article sélectionné est référencé, avec un court résumé de présentation.

- ◆ Michel Barquins, «Henri Becquerel et la découverte de la radioactivité naturelle couronnée, il y a cent ans, par le prix Nobel», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 97, n° 859 (1), p. 1563-1575, décembre 2003.

La vie, l'œuvre et la réussite d'Henri Becquerel dans divers domaines de la science et plus particulièrement dans celui de la radioactivité naturelle, dont on lui doit la découverte le 1^{er} mars 1896, doivent beaucoup à son entourage familial. On décrit ici, au travers de sa vie de famille et de sa vie professionnelle, comment les études des phénomènes de luminescence, de phosphorescence et de fluorescence amenèrent naturellement Henri Becquerel vers le prix Nobel de physique qu'il partagea en 1903, à parts égales, avec les époux Curie.

- ◆ Michel Laguës, «L'expérience reproduite : comment faire revivre la première mesure de radioactivité», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 869, p. 1677-1703 décembre 2004.

La découverte de la radioactivité se situe à la charnière entre deux mondes, au cœur de profondes révolutions scientifiques sans équivalents depuis lors. La première mesure quantitative du rayonnement de l'uranium, l'identification du polonium et du radium, ainsi que l'introduction du terme radioactivité ont lieu à l'EMPCI (École municipale de physique et chimie industrielle) en quelques mois grâce à l'expérience montée par Pierre et Marie Curie. Il nous a paru essentiel de remonter cette expérience emblématique dans des conditions aussi proches que possible de celles d'origine, et de la faire revivre pour tous ceux qui sont sensibles à cette page exceptionnelle de l'histoire des sciences et techniques.

- ◆ Jean-Louis Bretonnet, «Du noyau atomique à la centrale nucléaire», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 112, n° 1005, p. 789-808, juin 2018.

Après la découverte de la radioactivité naturelle par Henri Becquerel, en 1896, les recherches en

physique nucléaire se sont développées intensivement, tant sur le plan fondamental que sur celui des applications. Or, ces avancées ne se sont vraiment produites qu'une fois établie l'existence de l'électron (Joseph John Thomson, 1897), de l'atome (Ernest Rutherford, 1911) et l'identification du neutron (James Chadwick, 1932). Quant aux retombées techniques, économiques et politiques, elles sont apparues lorsqu'on s'est rendu compte que d'énormes quantités d'énergie se dégagent de certaines réactions nucléaires. Cet article donne un aperçu des réactions de fusion et de fission et de leurs applications.

- ◆ Jean Winther et France Villiaumey, «La décroissance radioactive : du discret au continu», *Bull. Un. Phys.*, vol. 97, n° 855, p. 963-985, juin 2003.

Lorsqu'un noyau est instable, il est susceptible de se désintégrer en noyaux plus petits et en diverses particules. L'activité d'un échantillon radioactif diminue avec le temps du fait de la disparition progressive des noyaux instables qu'il contient. La désintégration radioactive d'un noyau donné est un phénomène aléatoire. On peut cependant donner pour chaque isotope radioactif une demi-vie qui est le temps au bout duquel la moitié des atomes radioactifs initialement présents a disparu par transformation spontanée. Acquisition des données de désintégrations d'un radionucléide, traitement de données, simulation ou mise en évidence de la décroissance exponentielle peuvent s'opérer très simplement avec une calculatrice graphique qui peut aussi être interfacée pour faciliter le stockage des données.

- ◆ Guy Bouyrie, «Loi de décroissance radioactive», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 862 (1), p. 419-432, mars 2004.

Dans cet article, on rappelle quelques prérequis mathématiques qui portent sur la loi de décroissance radioactive. Des exemples expérimentaux sont étudiés, à partir de la désintégration de noyaux de radon 220, suivie par le compteur développé par la société Jeulin. L'exploitation des données est réalisée avec des logiciels dédiés (Generis, Regressi). La résolution de l'équation différentielle obtenue s'opère selon la méthode d'Euler, avec le but de restreindre la saisie de l'algorithme à sa syntaxe essentielle : le logiciel Regressi, une calculatrice graphique ordinaire, l'usage du langage Python désormais (non abordé dans cet article), répondent parfaitement à ce souci.

Une précision mathématique à la suite de cet article :

- Jacques Treiner, «Pourquoi dit-on qu'un noyau se désintègre "sans vieillir" ?», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 864, p. 735-735, mai 2004.

- ◆ André Warusfel, «La radioactivité : un mathématicien, un physicien et un probabiliste aux prises avec la radioactivité», *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 869, p. 1729-1743, décembre 2004.

Pourquoi un nombre entier de noyaux non encore désintégrés est-il bien représenté par une formule de la forme $N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$ qui a très peu de chances de donner des résultats entiers ? Ce conte moral se déroule dans une classe scientifique, au cours de l'année pendant laquelle sont introduites les notions de fonctions exponentielles et logarithme, la résolution des équations différentielles simples de la forme $y' = ay$ et une présentation de la radioactivité. Il ne s'agit naturellement pas d'un modèle de cours destiné aux professeurs ou aux élèves de terminale, mais d'un article de réflexion sur ce que pourrait être une collaboration interdisciplinaire qui

voudrait connaître les acteurs réels sous-jacents à cette importante question, où physique expérimentale, mathématique (méthode d'Euler) et probabilités (loi binomiale) jouent des rôles remarquablement complémentaires.

- ◆ Jean-Paul Roux, « Poussières radioactives », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 100, n° 882 (1), p. 289-298, mars 2006.

On peut ainsi être amené à étudier la radioactivité des poussières de l'air ambiant ce qui conduit à des résultats expérimentaux « alléchants » puisqu'on peut croire reconnaître une exponentielle décroissante, fonction très présente dans les problèmes de radioactivité. C'est inexact dans ce cas. La compréhension et l'exploitation de la courbe obtenue font appel à plusieurs notions complexes : loi de désintégration, chaîne radioactive, dépôts et transferts de radionucléides, fonctionnement d'un détecteur de radioactivité. L'étude des résultats obtenus permettra de dépasser le cadre de cette question pour rappeler que la découverte ou le test d'un modèle mathématique demandent beaucoup d'humilité et de précautions.

- ◆ Lucile Beck, « Les méthodes de datation font leur rentrée au lycée ! », *Bull. Un. Phys.*, vol. 96, n° 848, p. 1545-1551, novembre 2002.

Le nouveau programme de physique en terminale comporte un volet intitulé « Transformations nucléaires » comprenant le thème de la radioactivité. Une des applications retenues est la datation dont plusieurs méthodes sont présentées dans les manuels scolaires. Cet article a pour but d'apporter un complément d'information sur ces méthodes et de souligner quelques erreurs qui peuvent se glisser dans certains ouvrages.

- ◆ Philippe Hubert, Françoise Hubert et Véronique Raffestin-Tort, « La datation des vins : une application des mesures des très faibles radioactivités », *Bull. Un. Prof. Phys. Chim.*, vol. 98, n° 862 (1), p. 381-394, mars 2004.

La mesure par spectrométrie gamma bas bruit de fond a permis de mettre au point une technique de datation des vins. Cette méthode exploite les infimes traces de radioactivité contenues dans les vins millésimés et notamment le Cs-137 qui provient essentiellement des essais nucléaires atmosphériques et de l'accident de Tchernobyl. Le vin garde en mémoire ces événements. Ainsi, à partir de la mesure de l'activité en Cs-137 contenu dans chaque bouteille, et par comparaison avec une courbe de référence, le millésime d'un vin peut être vérifié, et ceci sans ouvrir la bouteille.

- ◆ J.-R. Lancelot, « Chronomètres et traceurs isotopiques : la mesure du temps », *Bull. Un. Phys.*, vol. 79, n° 667, p. 43-76, octobre 1984.

En sciences de la Terre, en biologie évolutive, en astronomie et en astrophysique, le paramètre temps s'exprime couramment en millions ou en milliards d'années. Actuellement, nous savons que l'âge de formation de la Terre comme celui de l'ensemble du système solaire est de 4,56 Ga : ces résultats ont été obtenus à l'aide de chronomètres basés sur le phénomène de radioactivité naturelle dont nous présentons quelques exemples utilisés en géologie.

- ◆ Istvan Berkes, « Cosmochronologie nucléaire », *Bull. Un. Phys.*, vol. 96, n° 842, p. 475-496, mars 2002.

La cosmochronologie nucléaire est basée sur la datation radioactive en utilisant des paires d'iso-

topes ou d'éléments. Dans cet article, nous examinons les âges de la Galaxie, que l'on peut tirer de l'analyse des météorites, du spectre d'absorption de la lumière solaire et de celle de certaines très vieilles étoiles.