

RADIUM

Le radium est l'élément chimique de numéro atomique 88, de symbole Ra.

Il est d'un aspect parfaitement blanc mais il noircit lors de son exposition à l'air libre. Le radium est un métal alcalino-terreux présent en très faible quantité dans les minerais d'uranium. Il est extrêmement radioactif, la période de son isotope le plus stable (²²⁶Ra) étant de 1 600 ans. Il fournit du radon comme produit de désintégration.



Marie Curie et son mari Pierre étudiant le radium, dessin d'André Castaigne.

Marie Curie et son mari Pierre le découvrent en 1898 par extraction de la pechblende, un minerai d'uranium. Le mot radium est forgé à partir du latin radius (« rayon »), en même temps que le mot radioactivité.

Historique

Le radium a été découvert par Marie Skłodowska-Curie et son mari Pierre Curie le 21 décembre 1898, dans un minerai d'uraninite. Lors de l'étude de ce minéral, les Curie en avaient extrait tout l'uranium, pour constater que le reliquat était encore fortement radioactif. En juillet 1898, ils extraient de la pechblende un élément comparable au bismuth, qui s'avère être du polonium. Ils séparent ensuite un mélange radioactif formé principalement de deux composants : des composés de baryum, qui produit une flamme d'un vert brillant, et un composé radioactif inconnu qui donne des lignes spectrales de couleur carmin, qui n'avait jamais été précédemment décrit. Les Curie constatent que ce composé radioactif est très similaire aux composés de baryum, mais moins soluble. Cela permet aux Curie d'isoler ce composé radioactif et de découvrir un nouvel élément, le radium.

Les Curie annoncèrent leur découverte à l'Académie des sciences le 26 décembre 1898.

L'élément fut baptisé « radium » vers 1899. Le mot est formé sur le latin *radius*, le rayonnement, pour rappeler le fort rayonnement radioactif de cet élément.

Le radium a été isolé sous forme métallique en 1910 par Marie Curie et André-Louis Debierne dans leur laboratoire de l'École municipale de physique et de chimie industrielles. Ils procédèrent à une électrolyse d'une solution de chlorure de radium (RaCl₂) sur une cathode de mercure, produisant ainsi un amalgame. Cet amalgame fut ensuite chauffé dans une atmosphère d'hydrogène pour éliminer le mercure, laissant le radium pur sous forme métallique. La même année, E. Eoler isola également le radium par décomposition thermique de l'azoture de radium, Ra(N₃)₂.

La première production industrielle du radium sous forme métallique a été réalisée par Biraco, filiale de l'Union minière du Haut Katanga (UMHK), dans son usine d'Olen en Belgique.



L'unité historique de radioactivité, le curie (en l'honneur de Pierre Curie décédé en 1906) correspond à la radioactivité d'un gramme de radium 226, Ra₁₄, soit 37 gigabecquerels (37 × 10⁹ Bq). En 1911, Marie Curie obtient le prix Nobel de chimie « en reconnaissance de sa contribution aux progrès de la chimie pour avoir découvert le radium et le polonium, avoir isolé le radium, et avoir étudié la nature et les composés de cet élément remarquable ».

Caractéristiques physiques et chimiques

C'est le plus dense des métaux alcalino-terreux avec lesquels il partage des caractéristiques (comportement assez proche de ceux du béryllium, magnésium, calcium, strontium et baryum) expliquant sa cinétique environnementale ou son métabolisme. L'élément qui lui est le plus proche est le baryum (autre cation divalent), mais le radium est moins bien étudié à cause des contraintes de radioprotection qu'impose sa radioactivité.

Propriétés physiques

Fraichement préparé, le radium pur est blanc et brillant, mais il noircit lorsqu'il est exposé à l'air (probablement par formation de nitrure Ra₃N₂). Sa densité est de 5,5 g/cm³, plus élevée que celle du baryum. Son point de fusion est mal déterminé, entre 700 et 960 °C, et sa température d'évaporation est de 1 737 °C. Ces deux valeurs sont légèrement inférieures à celles du baryum, ce qui correspond à la tendance générale des éléments du groupe.

De même que le baryum, le radium forme dans les conditions normales de température et de pression un réseau cristallin cubique centré, de maille 514,8 picomètres.

Le radium est luminescent (il émet une faible couleur bleue), et il est un peu plus volatil que le baryum.

Propriétés chimiques

De même que le baryum, le radium est un métal très réactif, et se retrouve généralement dans un degré d'oxydation de +2. Il s'hydrolyse dans l'eau par formation d'hydroxyde de radium. Il se présente en solution aqueuse sous forme de cation incolore Ra²⁺, très fortement basique.

Il ne forme pas facilement de complexe. La plupart des composés chimiques du radium sont donc formés de liaison ionique. Cependant, les électrons 6s et 6p (outre l'électron de valence 7s) pourraient participer à un effet chimique quantique relativiste renforçant le caractère covalent de la liaison avec des composés comme RaF₂ ou encore RaAt₂.

Comme le baryum, il forme des sels solubles sous forme de chlorure, bromures et nitrates, alors qu'il est très faiblement soluble sous forme de sulfate, de carbonates, phosphates et phosphates acides. Ceci explique qu'en mer et dans les eaux saumâtres, la teneur de l'eau en ions libres de radium sera contrôlée par l'activité sulfate de l'eau. En pleine mer, il est à 70 % complexé sous forme de RaSO₄ et pour le reste en grande partie complexé à la matière organique dissoute (en complexes organométalliques dont la stabilité diminue avec l'augmentation de la salinité). En présence de baryum et dans une eau riche en sulfate, il précipite en Ba RaSO₄.

Propriétés radiologiques

Radioactivité du radium 226

Le radium ne possède aucun isotope stable. L'isotope majoritaire, qui est celui historiquement découvert par les Curie, est le radium 226 (période : 1 600 a).

Présence dans les chaînes de désintégration

Le radium fait partie des chaînes de désintégration de l'uranium et du thorium, avec lesquels il peut se trouver en équilibre séculaire. Quatre de ses 25 isotopes possibles existent dans la nature à l'état de traces : ²²³Ra, ²²⁴Ra, ²²⁶Ra et ²²⁸Ra, tous les quatre radioactifs et tous issus de la dégradation radioactive d'autres radio-isotopes d'origine naturelle. On le rencontre donc en très petites quantités associé aux dépôts d'uranium, et à l'état de traces associé au thorium :

Une tonne de thorium 232 est en équilibre séculaire avec 0,4 mg de radium 228 (période de 5,75 ans) et 0,7 µg de radium 224 (période de 3,63 j)

Une tonne d'uranium naturel, formée majoritairement d'uranium 238, est en équilibre avec 360 mg de radium 226 (période de 1590 ans) ; et les 7,2 kg d'uranium 235 présents sont de leur côté en équilibre avec 550 ng de radium 223 (de période 11,4 jours).

Bien que ces quantités soient extrêmement faibles, la radioactivité induite (qui est inversement proportionnelle à la période) est très importante : le radium contribue autant que l'uranium à la radioactivité d'un minerai d'uranium, de même pour le thorium. Ainsi, l'activité moyenne du ²²⁶Ra dans la roche est de quelques dizaines de Bq/kg (becquerels par kilogramme), mais elle peut être mille fois supérieure dans les sols ou les zones riches en minerai d'uranium.

Aux premiers temps de l'étude de la radioactivité, les isotopes des chaînes de désintégration ne pouvaient pas être caractérisés par leurs propriétés chimiques, quand leur durée de vie était trop brève (inférieure à l'année), mais uniquement par leur radioactivité. Ils recevaient par conséquent un nom spécifique reflétant leur formation :

²²⁶Ra (le premier découvert et le plus facile à isoler chimiquement) était le radium (Ra) ;

²²³Ra (descendant de l'actinium 227 via le thorium 227) était nommé actinium X (AcX) ;

²²⁸Ra (produit par le thorium 232) était le mésothorium 1 (MsTh1) ;

²²⁴Ra (descendant du thorium 228, et du thorium 232 à la quatrième génération) était nommé thorium X (ThX).

De même, les produits de désintégration successifs du ²²⁶Ra reçurent des noms formés sur radium, de « radium A » jusqu'à « radium G ».

Abondance relative

Les deux isotopes du radium que l'on peut isoler chimiquement sont ²²⁶Ra, descendant de l'uranium 238 et de 1 590 ans de période, et ²²⁸Ra, descendant du thorium 232 et de période de 5,739 années^{24,21}. Les autres sont plus difficilement isolables (²²³Ra dont la période est de 11,1 jours et ²²⁴Ra dont la période est de 3,64 jours sont présents à des teneurs de l'ordre du nanogramme par tonne) et ne sont en pratique observés que par la radioactivité qu'ils engendrent.

Ses isotopes naturels sont utilisés pour dater certains matériaux radioactifs (baryte) rencontrés dans les forages gaziers ou pétroliers.

L'isotope à la durée de vie la plus longue, le radium 226 (²²⁶Ra), représente en pratique la quasi-totalité du radium naturellement présent sur Terre.

Mesure de la radioactivité

Dans un échantillon de sol ou de produits végétaux ou animaux, ou encore dans les eaux minérales fortement chargées, le radium est mesuré directement par spectrométrie gamma, en association avec ses descendants à vie courte, (^{214}Pb et ^{214}Bi), après mise à l'équilibre de l'échantillon pendant un mois (de manière que l'équilibre se fasse avec le reste de ses descendants jusqu'au plomb-210).

Dans les eaux naturelles faiblement chargées, la mesure est effectuée par émanométrie du radon (^{222}Rn) : le radon dissous dans l'eau est dégazé par bullage et récupéré dans des fioles scintillantes pour effectuer la mesure.

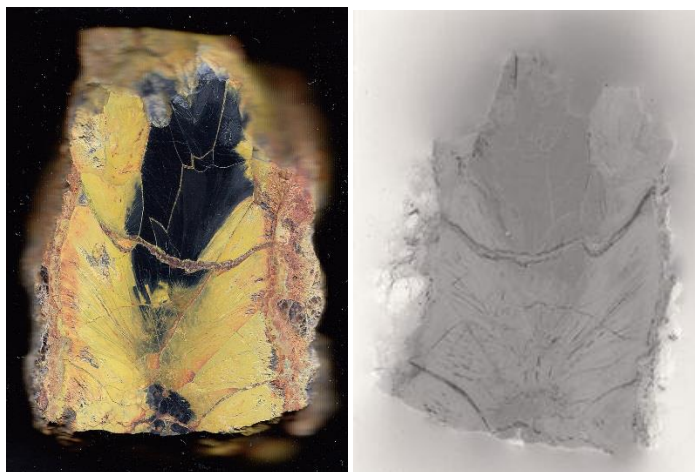
Minéralogie du radium

Gisements

Le radium est surtout présent à l'état de traces dans certains sous-sols anciens. Dans le sol, il est présent sous forme combinée et plus concentrée dans la pechblende, un minerai d'uranium, ainsi que dans d'autres minéraux d'uranium. Il faut environ trois tonnes de pechblende pure pour extraire un gramme de radium.

Le charbon contient des traces parfois significatives d'uranium et donc de radium, qu'on retrouve parfois dans les crassiers de cendres charbonneuses (issus des centrales thermiques ou de la sidérurgie) et parfois les fumées, quand elles ne sont pas filtrées. La combustion du charbon est une voie de dissémination du radium ; la teneur en ^{226}Ra des cendres de charbon est de l'ordre de 120 Bq/kg²².

Les schistes exploités (depuis 2004 principalement) pour le gaz de schiste en contiennent également, en quantité parfois importantes. De manière générale, plus un schiste est noir ; c'est-à-dire à haute teneur en COT (carbone organique total), plus il en contient. C'est le cas par exemple des schistes noirs du Dévonien²⁶ de la région des Appalaches^{27,28} et en particulier de ceux du bassin de Marcellus²⁹.



Section polie de pechblende et le papier photographique impressionné par son rayonnement.

Production minière

Le radium est extrait de minerais d'uranium, sa production minière est essentiellement associée à l'extraction de l'uranium. Aucun gisement n'est exploité pour son radium, mais la production d'uranium justifie l'extraction minière, et permet de rentabiliser la séparation du radium comme coproduit.

Jusque vers la fin du XVIII^e siècle, l'uranium n'avait pas d'application industrielle à grande échelle, et il n'y avait donc pas de mines d'uranium en tant que telles. Initialement, la seule source abondante de minerai d'uranium était la mine

d'argent de Jáchymov (Sankt-Joachimsthal en allemand), alors située dans l'empire d'Autriche. Le minerai d'uranium était un produit dérivé des activités minières, rejeté comme stérile sous forme de pechblende.

Après que Pierre et Marie Curie eussent isolé le radium à partir du minerai de cette mine de Sankt-Joachimsthal, de nombreux scientifiques commencèrent à s'y intéresser, mais la disponibilité du radium resta longtemps faible. De petites entreprises rachetèrent les stériles de la mine, pour en isoler le radium en petites quantités. La mine fut rachetée par le gouvernement autrichien en 1904, et l'exportation de minerai brut fut suspendue.

La prise de contrôle de l'Autriche conduisant à un monopole, la demande croissante en radium conduisit les autres pays à une intense prospection pour trouver de nouveaux gisements d'uranium. Les États-Unis devinrent les premiers producteurs mondiaux au début des années 1910, par l'exploitation des sables de carnotite du Colorado. Mais les gisements les plus riches découverts à cette époque se situaient au Congo belge, et dans les régions du Grand lac de l'Ours et du Grand Lac des Esclaves au Canada.

La production de radium a toujours été faible ; par exemple, en 1918, les États-Unis ne produisirent qu'un total de 13,6 g de radium. En 1954, il n'y avait au total que 2,3 kg de radium disponible sous forme purifiée dans le monde, et ce chiffre n'a guère augmenté de nos jours, la production mondiale n'étant que de l'ordre de 100 g par an.

Les principaux producteurs de radium sont la Belgique, le Canada, la République tchèque, la Slovaquie, le Royaume-Uni, et les anciens États de l'Union soviétique.

Applications

Les rares applications du radium proviennent toutes de ses propriétés radioactives.

Applications médicales

La curiethérapie de contact a commencé en 1901, peu après la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel en 1896, quand Pierre Curie a suggéré à Henri-Alexandre Danlos qu'une source radioactive peut être insérée dans une tumeur.

Des sources de radium ont été utilisées en curiethérapie, traitement où une source radioactive scellée est placée à l'intérieur ou à proximité immédiate de la zone à traiter, généralement sous forme d'aiguilles contenant du radium. Les tumeurs peuvent ainsi être traitées avec des doses très élevées de radiations localisées, en réduisant la probabilité de dommages pour les tissus sains environnants.



Aiguilles au radium.

À la suite de l'intérêt initial pour la curiethérapie en Europe et aux États-Unis, son utilisation a diminué au milieu du XXe siècle en raison des problèmes d'irradiation des opérateurs dus à l'application manuelle des sources radioactives³.

La mise en évidence de ses vertus thérapeutiques dans la lutte contre le cancer a donné naissance à la radiothérapie, encore utilisée de nos jours.

L'isotope ^{223}Ra est par ailleurs le seul radioisotope commercialisé pour une application en radiothérapie, sous forme de chlorure.

Source de luminescence



L'extrémité de l'aiguille et les points du cadran de cette ancienne horloge ont été rendus fluorescents par incorporation de sels de radium.

Le radium a été utilisé jusqu'aux années 1950, pour ses propriétés de radioluminescence, dans des peintures destinées à l'horlogerie, à l'aviation et aux dispositifs de signalisation de secours. Ce type de peinture était obtenu en incorporant le radium (^{226}Ra ou plus rarement ^{228}Ra) sous forme de sulfate, chlorure ou bromure dans un phosphore de sulfure de zinc. La première utilisation américaine identifiée a été celle de George F. Kunz, qui avait peint au radium les aiguilles de sa montre pour les voir dans l'obscurité, et déposa un brevet sur ce procédé en septembre 1903.

La demande en cadrans luminescents entraîna une hausse rapide de la production, réalisée par la société US Radium Corp, bientôt en position de monopole sur le marché américain.

À partir des années 1920, des maladies potentiellement professionnelles furent identifiées chez les ouvrières, qui affinaient leurs pinceaux de peinture, enrichie en radium, en les portant à leur bouche. Ces maladies conduisirent à une première enquête épidémiologique, et à la fermeture de l'usine du New Jersey en 1926. L'enquête menée par le ministère du Travail déboucha en 1929 sur la publication d'un rapport, Radium Poisoning, recommandant des mesures de protection des employés (en particulier l'interdiction de sucer les pinceaux), et recommandant d'éviter d'utiliser du radium comme source lumineuse.

Cette pratique a entraîné quelques dizaines de décès chez les ouvrières (46 cas sur 1747 employés). Aucun symptôme n'a été observé chez les peintres ayant reçu moins de 1 000 fois la dose d'irradiation naturelle par le ^{226}Ra absorbée par les individus non exposés, ce qui suggère l'existence d'un seuil pour les affections malignes induites par le radium.

L'utilisation du radium comme source de photoluminescence a été abandonnée dans les années 1960, le radium étant remplacé dans cet usage par le tritium beaucoup moins dangereux pour la santé (mais en revanche moins durable).

Source d'ionisation

Dès 1914, le physicien hongrois Béla Szilárd propose de renforcer l'ionisation naturelle autour des installations de protection foudre avec des sources radioactives placées à proximité de la pointe des paratonnerres. L'idée aboutit à la commercialisation de paratonnerres radioactifs, plus simplement surnommés parads. Ces « Parads » ayant une activité de quelques dizaines de MBq pour les émetteurs alpha, et pouvant atteindre 1 GBq pour d'autres.

Cet effet n'a pas été démontré. Les doutes sur la validité du procédé, compte tenu de la difficulté de prouver son efficacité, émergent dans les années 1970, et ce système n'est plus commercialisé. De nombreux pays sont allés jusqu'à les interdire à partir des années 1980, en 1985 en Belgique, et 1er janvier 1987 pour la France. Certains pays (Belgique et Luxembourg notamment) imposent un démontage de ces paratonnerres radioactifs (parad). Depuis le 11 mars 2011 un site Internet d'intérêt collectif réalise l'inventaire et la localisation des dizaines de milliers de parad disséminés sur le territoire français. Il fait notamment appel à la mobilisation civique des internautes⁴³. Ils sont à présent remplacés par des détecteurs

Le radium est également utilisé comme source radioactive scellée dans des détecteurs ioniques de fumée, pour ioniser le volume d'air circulant dans l'appareil. En présence de fumée, la conductivité électrique de ce volume diminue, ce qui déclenche l'alarme. Interdits pour un usage domestique, ces détecteurs s'emploient souvent dans les immeubles de bureaux ou les lieux publics⁴⁴. Ils sont remplacés par des technologies alternatives (détecteurs optiques) d'un niveau équivalent de fiabilité, mais sans risque sanitaire et environnemental.

Engouement populaire



Pot de crème Tho-Radia



Une fontaine de radium : l'eau passe par une capsule de sels de radium et devient radioactive (1930).



Image datant de 1900, intitulée "chauffage au radium", anticipant à tort l'usage massif du radium en l'an 2000.



Flacon de Radithor.

Le radium a connu un fort engouement après sa découverte au début du XXe siècle par Marie Curie, en particulier après la mise en évidence de ses vertus thérapeutiques. La radiothérapie douce devint une mode, avec des produits très variés, des crèmes rajeunissantes (Tho-Radia) aux cigarettes, des sodas atomiques aux poudres de riz, dentifrices ou sels de bains, talc pour bébé, ou encore des fontaines à radium (le Revigator (en) pour boire de l'eau radioactive)⁴⁶.

Dans les années 1920, cette mode de la radiothérapie douce entraîna la mise sur le marché de prétendus baumes de jouvence et remèdes universels contenant du radium, dont le Radithor, qui fit des victimes aux États-Unis, notamment dans le cas tragique d'Eben Byers, mort irradié en 1932.

Le radium est utilisé un peu partout avant d'être interdit en 1937 pour les utilisations non médicales, plusieurs décès ayant été observés à l'institut du Radium de Londres consacré aux applications médicales.

Le radium est si cher qu'il est incorporé en quantité infime, comme le confirme le certificat d'analyse du Laboratoire de recherches scientifiques de Colombes en date du 18 juillet 1932 sur la crème Tho-Radia qui contient : « 0,233 microgramme de bromure de radium (RaBr₂, H₂O) [ce qui correspond à environ 4500 Bq] pour 100 grammes de crème ».

Le radium dans l'environnement

Radium en solution

Le radium peut passer dans l'hydrosphère par lessivage de minerais, ou y être directement produit par l'uranium ou le thorium déjà dissout dans l'eau. La concentration du ²²⁶Ra peut être importante dans les eaux d'infiltration des

mines d'uranium, que ce soit par sa mise en contact avec le minerai d'uranium, mais plus encore par le lessivage des résidus de traitement, pour lesquels le minerai a été concassé pour en extraire l'uranium, ce qui rend le radium d'autant plus mobile.

Même si les quantités correspondantes sont infinitésimales, elles peuvent être détectées par la radioactivité qu'elles induisent, qui est d'autant plus forte que la période du radionucléide est faible.

Les deux isotopes du radium les plus fréquents dans la mer sont ²²⁶Ra et ²²⁸Ra. Les autres sont plus rarement observés. Ils servent parfois de radioélément traceur (par exemple pour repérer les vidanges naturelles de nappes d'eau souterraine en mer, notamment autour de la Sicile). On les trouve aussi en faible dose dans les océans (avec de fortes variations temporelles des teneurs pouvant traduire des modifications de courants), dans certains lacs ou dans certaines eaux souterraines sources accidentellement ou naturellement radioactives. On en trouve d'infimes quantités dans certaines nappes phréatiques utilisées pour alimenter des réseaux d'eau potable, et en quantité plus significative (plus rarement) dans certains forages profonds (par exemple proches de failles et/ou de massifs souterrains uranifères ; ex. : jusqu'à 23 pCi/Litre de Ra et 3 300 pCi/Litre de Rn dosés dans certains des puits du nord-ouest et sud-ouest du comté de Harris au Texas). La mer Morte est un cas particulier avec une radioactivité en radium différenciée : passant de 114,5 dpm/kg dans les eaux de surface, à 97,8 dpm/kg en profondeur (avec une couche de transition de 25 m d'épaisseur environ, à une profondeur de 150 à 175 m). Les données sur le radon dans cette mer ont servi à mesurer la durée de la méromicticité.

Dégazage de radon

Le marquage au radium 226 est peu dangereux par lui-même, mais le radium 226 se désintègre en radon 222 (²²²Ra), gaz radioactif, qui peut conduire à des doses importantes de rayonnement dans les habitations.

Le radon est produit au même débit que dans le minerai d'uranium d'origine, mais peut dégazer beaucoup plus facilement d'un substrat non consolidé (résidus d'extraction de l'uranium ou du thorium) et se répandre dans l'atmosphère. Il est susceptible de poser des problèmes de santé publique quand il s'accumule dans des locaux insuffisamment ventilés (au-delà de 1 000 Bq m⁻³).

Un microgramme de radium, qui présente une activité de 37 000 Bq, se met rapidement en équilibre séculaire avec la même activité de radon. Si ce radon ne rencontre pas d'obstacle à sa diffusion (par exemple, si le radium est en solution aqueuse dans un récipient non bouché), il est alors susceptible de saturer une pièce de taille moyenne à des niveaux de l'ordre de 1 000 Bq m⁻³.

Bioaccumulation

Le seul isotope susceptible d'avoir un rôle dans la biosphère est le radium 226 produit par l'uranium 238 ; les autres isotopes ont une production et une durée de vie beaucoup trop faibles pour jouer un rôle comparable.

Au moins dans certaines conditions (et par certaines espèces), le radium semble biodisponible, bio assimilable et susceptible d'être bioconcentré, voire bioaccumulé. Par exemple une espèce australienne de moule d'eau douce (*Velesunio angasi*) a été étudiée dans le cadre d'un suivi scientifique (avec bio monitoring depuis 2001) de billabongs (bras morts restant en eau en saison sèche) du ruisseau Magela drainant le bassin où est situé la mine d'uranium Ranger. Ces moules avaient été trouvées les plus contaminées à 20 km en aval du site minier. Elles se sont montrées capables de concentrer le radium ; dans ce cas, le radium semble prendre la place du calcium dans l'organisme, mais d'autant moins que le calcium est abondant dans le milieu. Il a une période biologique assez longue, estimée (par modélisation) à environ 13 ans pour cette espèce). Comme souvent avec les animaux filtreurs, le facteur de concentration de radium s'est montré élevé chez les moules du bassin versant de la rivière Magela (30 000 à 60 000 fois la teneur du milieu pour la chair de la moule, mais du radium pourrait aussi être accumulé dans les coquilles).

Peu avant, sur les bassins de lagunage de cette mine, puis en microcosme, on avait déjà montré (2004) que la plante aquatique *Eleocharis dulcis* bioaccumulait lentement mais efficacement de l'uranium dans ses racines et rhizomes après l'avoir capté dans l'eau.

SOURCES

Girault, F., Perrier, F., Poitou, C., Isambert, A., Théveniaut, H., Laperche, V., ... & Douay, F. (2016). *Effective radium concentration in topsoils contaminated by lead and zinc smelters* ^[archive]. Science of The Total Environment, 566, 865-876.

RÉFÉRENCES

(en) Beatriz Cordero, Verónica Gómez, Ana E. Platero-Prats, Marc Revés, Jorge Echeverría, Eduard Cremades, Flavia Barragán et Santiago Alvarez, « Covalent radii revisited », *Dalton Transactions*, 2008, p. 2832 - 2838 (DOI 10.1039/b801115j)

(en) David R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC, 2009, 89^e éd., p. 10-203

(en) David R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press Inc, 2009, 90^e éd., 2804 p., Relié (ISBN 978-1-420-09084-0)

Base de données Chemical Abstracts interrogée via SciFinder Web le 15 décembre 2009 (résultats de la recherche)

Hammond, C. R. "Radium" in Haynes, William M., ed. (2011). *CRC Handbook of Chemistry and Physics* (92nd ed.). Boca Raton, FL: CRC Press.(ISBN 1439855110).

Pierre Curie, Marie Curie et Gustave Bémont, « Sur une nouvelle substance fortement radio-active, contenue dans la pechblende », *Comptes Rendus*, vol. 127, 1898, p. 1215–1217, consulté le 1^{er} août 2009). La communication a été lue par Becquerel lui-même.

Mary Elvira Weeks, « The discovery of the elements. XIX. The radioactive elements », *Journal of Chemical Education*, vol. 10, n^o 2, 1933, p. 79 (DOI 10.1021/ed010p79, Bibcode 1933JChEd..10...79W).

(en) Fernando P. Carvalho, « Marie Curie and the Discovery of Radium », dans Broder Merkel, Mandy Schipek, *The New Uranium Mining Boom : Challenge and Lessons learned*, Springer Berlin Heidelberg, coll. « Springer Geology », 2011, 3-13 p. (ISBN 978-3-642-22121-7, DOI 10.1007/978-3-642-22122-4_1).

Mary Elvira Weeks, « The discovery of the elements. XIX. The radioactive elements », *Journal of Chemical Education*, vol. 10, 1^{er} février 1933, p. 79 (ISSN 0021-9584, DOI 10.1021/ed010p79).

Marie Curie et André Debierne, « Sur le radium métallique" (On metallic radium) », *Comptes Rendus*, vol. 151, 1910, p. 523–525, consulté le 1^{er} août 2009).

H. W Kirby et Murrell L Salutsky, *The Radiochemistry of Radium*, National Academies Press, 1964.

C. Ronneau et O. Bitchaeva, *Biotechnology for waste management and site restoration: Technological, educational, business, political aspects*, Scientific Affairs Division, North Atlantic Treaty Organization, 1997 (ISBN 978-0-7923-4769-9), p. 206.

Paul W. Frame, « How the Curie Came to Be » (consulté le 30 avril 2008).

(en) « in recognition of her services to the advancement of chemistry by the discovery of the elements radium and polonium, by the isolation of radium and the study of the nature and compounds of this remarkable element » in Personnel de rédaction, « *The Nobel Prize in Chemistry 1911* », Fondation Nobel, 2010. Consulté le 2 juillet 2010..

David A. Young, *Phase Diagrams of the Elements*, University of California Press, 1991 (ISBN 0-520-91148-, « Radium », p. 85.

D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, Boca Raton (FL), CRC Press, 2004, 84th éd. (ISBN 978-0-8493-0484-2).

F. Weigel et A. Trinkl, *Radiochim. Acta*, 1968, 19, 78.

John S. Thayer, *Chemistry of heavier main group elements*, 2010 (DOI 10.1007/9781402099755_2), p. 81.

Jerry M. Neff Ph.D. , *Chapter 11 - Radium Isotopes in the Ocean ; Bioaccumulation in Marine Organisms ; Effect of Contaminants from Oil Well Produced Water* ; 2002, Pages 191-201 ; doi:10.1016/B978-008043716-3/50012-9. résumé

P. Bérard, M.L. Perrin, E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette, J. Brenot et D. Robeau, « Radium 226 et ses descendants à l'équilibre », sur *irsn.fr*, 1^{er} août 2001 (consulté le 14 octobre 2016).

« Isotope data for Radium226 in the Periodic Table », sur *www.periodictable.com* (consulté le 9 mars 2016).

« Isotope data for Radium228 in the Periodic Table », sur *www.periodictable.com* (consulté le 9 mars 2016).

A. Zielinski, J.K. Otton, J.R. Budahn, *Use of radium isotopes to determine the age and origin of radioactive barite at oil-field production sites* ; Environmental Pollution, Volume 113, Issue 3, août 2001, pages 299-309R. (Résumé [archive]).

Schmoker, James W (1981), *Determination of Organic-Matter Content of Appalachian Devonian Shales from Gamma-Ray Logs*, AAPG Bulletin, 65(7):1285- 1298.

Leventhal JS (1981) "Pyrolysis gas chromatography - mass spectrometry to characterize organic matter and its relationship to uranium content of Appalachian Devonian black shales Geochim Cosmochim Acta 45 p relationship to uranium content of Appalachian Devonian black shales", GCA 45 p. 883-889.

Cathles, L.M. *Why radium in shales and how to process* ; Cornell University.

Resnikoff M (2010) *Radioactivity in Marcellus Shale*, Report prepared for Residents for the Preservation of Lowman and Chemung (RFPLC), <http://www.rwma.com/Marcellus%20Shale%20Report%205-18-2010.pdf>.

Beate Ceranski, « Tauschwirtschaft, Reputationsökonomie, Bürokratie », *NTM Zeitschrift für Geschichte der Wissenschaften, Technik und Medizin*, vol. 16, n° 4, 2008, p. 413 (DOI 10.1007/s00048-008-0308-z).

Evan Just, Philip W. Swain et William A. Kerr, « Peacetime Impact of Atomic Energy », *The Analysts Journal*, vol. 8, n° 1, 1952, p. 85–93 (DOI 10.2469/faj.v8.n1.85, JSTOR 40796935).

C. H. Viol, « Radium Production », *Science*, vol. 49, n° 1262, 1919, p. 227–8 (PMID 17809659, DOI 10.1126/science.49.1262.227, Bibcode 1919Sci....49..227V).

JG Terrill Jr, 2nd Ingraham Sc et DW Moeller, « Radium in the healing arts and in industry: Radiation exposure in the United States », *Public health reports*, vol. 69, n° 3, 1954, p. 255–62 (PMID 13134440, PMCID 2024184, DOI 10.2307/4588736).

(en) Norman N. Greenwood et Alan Earnshaw, *Chemistry of the Elements*, Butterworth-Heinemann, 1997, 109–110 p. (ISBN 0080379419).

(en) VK. Gupta, « Brachytherapy – past, present and future », *Journal of Medical Physics*, vol. 20, 1995, p. 31-38.

(en) S Nag, « A brief history of brachytherapy » (consulté le 25 septembre 2009).

(en) J. Aronowitz, « The “Golden Age” of prostate brachytherapy: A cautionary tale », *Brachytherapy*, vol. 7, n° 1, 2008, p. 55-59.

(en) A C Baker et C Toque, « A review of the potential for radium from luminising activities to migrate in the environment », *IOP Publishing*, vol. 25, n° 2, 1^{er} juin 2005, p. 127–140 (ISSN 0952-4746, DOI 10.1088/0952-4746/25/2/001).

(en) R. E. Rowland, *Radium in Humans: A Review of U.S. Studies*, Argonne (Illinois), Argonne National Laboratory, 1994, 246 p.

« Identification des sources et des dispositifs radioactifs » [PDF], sur *iaea.org*, AIEA (consulté le 8 mai 2010), p. 92.

« Le radium, pour le meilleur et pour le pire », *La Recherche*, n° 315, 1998, p. 76.

« Inventaire national des paratonnerres radioactifs ».

La gestion des sources radioactives usagées, Andra, inventaire 2012 - dossier 2.

Thierry Lefebvre et Cécile Raynal, « L'histoire étonnante du Tho-Radia », *Revue d'histoire de la pharmacie*, vol. 335, 2002, p. 461-480.

Les "pouvoirs miraculeux" de la radioactivité, info nucléaire.

(en) « Death Stirs Action on Radium 'Cures'. Trade Commission Speeds Its Inquiry. Health Department Checks Drug Wholesalers. Autopsy Shows Symptoms. Maker of "Radithor" Denies It Killed Byers, as Does Victim's Physician in Pittsburgh. Walker Uses Apparatus. Friends Alarmed to Find Mayor Has Been Drinking Radium-Charged Water for Last Six Months. », *New York Times*, 2 avril 1932 :

« Federal and local agencies, as well as medical authorities in various parts of the country, were stirred to action yesterday as a result of the death of Eben M. Byers, wealthy Pittsburgh steel manufacturer and sportsman, who died here Wednesday at the Doctors' Hospital from causes attributed to radium poisoning resulting from the drinking of water containing radium in solution. ... »

Dans les années 1930, l'Union minière n'extrait annuellement que 60 g de radium dans le monde.

Janine Trotereau, « Marie Curie : une icône de la République », émission *La Marche des sciences* sur France Culture, 31 mai 2012.

René Jacquet, *Dictionnaire médical et pratique de soins de beauté*, Tho-Radia, 1935, p. 113.

W.C. Burnett, et al. *Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods* ; Science of The Total Environment, Volume 367, Issues 2-3, 31 août 2006, pages 498-543.

Willard S. Moore, *Radium isotopes as tracers of submarine groundwater discharge in Sicily* ; Continental Shelf Research Volume 26, Issue 7, mai 2006, pages 852-861 Submarine Groundwater Discharge Studies Offshore South-Eastern Sicily doi:10.1016/j.csr.2005.12.004.

David F. Reid, *Radium variability produced by shelf-water transport and mixing in the western Gulf of Mexico* ; Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers Volume 31, Issue 12, décembre 1984, pages 1501-1510 doi:10.1016/0198-0149(84)90084-0 .

Joseph M. Smoak, James M. Krest, *Source of radium in a well-water-augmented Florida lake* ; Journal of Environmental Radioactivity Volume 89, Issue 1, 2006, pages 102-114 doi:10.1016/j.jenvrad.2006.03.007.

B.L. Dickson, R.L. Meakins, C.J. Bland, *Evaluation of radioactive anomalies using radium isotopes in ground waters* ; Journal of Geochemical Exploration, Volume 19, Issues 1-3, décembre 1983, Pages 195-205.

O.K. Hakam, A. Choukri, J.L. Reyss, M. Lferde, *Determination and comparison of uranium and radium isotopes activities and activity ratios in samples from some natural water sources in Morocco* ; Journal of Environmental Radioactivity, Volume 57, Issue 3, 2001, pages 175-189.

Irina Cech, Mengistu Lemma, Charles W. Kreitler, Howard M. Prichard, *Radium and radon in water supplies from the Texas Gulf Coastal aquifer* ; Water Research Volume 22, Issue 1, January 1988, Pages 109-121 doi:10.1016/0043-1354(88)90137-6.

Andreas Bollhöfer, Jenny Brazier, Chris Humphrey, Bruce Ryan, Andrew Esparon, *A study of radium bioaccumulation in freshwater mussels, *Velesunio angasi*, in the Magela Creek catchment, Northern Territory, Australia* Journal of Environmental Radioactivity Volume 102, Issue 10, octobre 2011, pages 964-974 South Pacific Environmental Radioactivity Association: 2008 conference doi:10.1016/j.jenvrad.2010.04.001.

Robyn A. Overall, David L. Parry, *The uptake of uranium by *Eleocharis dulcis* (Chinese water chestnut) in the Ranger Uranium Mine constructed wetland filter*, Environmental Pollution, Volume 132, Issue 2, novembre 2004, pages 307-320.

