

LES NOUVELLES SUBSTANCES RADIOACTIVES ET LES RAYONS QU'ELLES ÉMETTENT*

Rayons uraniques. — Les recherches sur les substances radioactives ont leur point de départ dans la découverte des rayons uraniques par M. Becquerel. L'émission de rayons particuliers par les composés d'urane et les propriétés de ces rayons ont été exposées par M. Becquerel dans son Rapport. Nous rappellerons donc seulement que les rayons uraniques ou *rayons de Becquerel* sont caractérisés par les propriétés suivantes: ils se propagent rectilignement; ils agissent sur les plaques photographiques comme la lumière, mais à un degré extrêmement faible; ils peuvent traverser des écrans de diverses natures, mais seulement sous très faible épaisseur; ils ne sont ni réfléchis, ni réfractés, ni polarisés; en traversant les gaz, ils les rendent faiblement conducteurs de l'électricité.

Le rayonnement uranique est spontané et constant; il n'est entretenu par aucune cause excitatrice connue; il semble insensible aux variations de température et d'éclairement.

Si l'on fait abstraction de l'origine inconnue du rayonnement uranique et si l'on n'en considère que les propriétés, on constate qu'il y a analogie entre les rayons uraniques d'une part, les rayons cathodiques et les rayons de Röntgen d'autre part; il y a aussi analogie avec les rayons secondaires produits par les métaux à forte masse atomique sous l'action des rayons de Röntgen.

Nous appellerons *radioactives* les substances qui émettent des rayons de Becquerel.

Méthode de mesure. — Pour étudier la radioactivité de diverses substances, nous employons la méthode électrique. On mesure la conductibilité acquise par l'air sous l'influence de la substance radioactive. Voici l'appareil qui sert à cet effet:

* [En commun avec Pierre Curie; *Rapports présentés au Congrès international de Physique*, 1900, t. III, p. 79 — ed.].

Un condensateur (*fig. 1*) se compose de deux plateaux A et B. La substance active pulvérisée est étalée sur le plateau B; elle rend conducteur l'air entre les plateaux. Pour mesurer cette conductibilité, on porte le plateau B

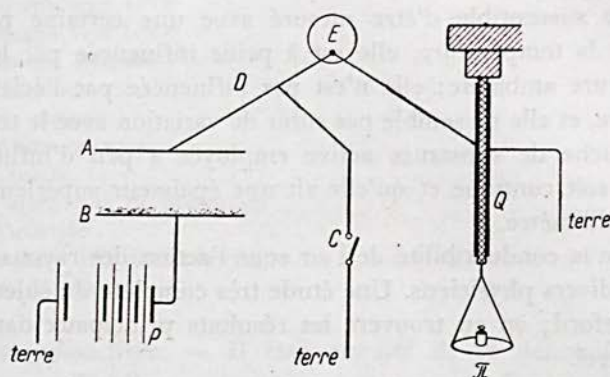


Fig. 1

à un potentiel élevé en le reliant à l'un des pôles d'une pile d'un grand nombre d'éléments P dont l'autre pôle est à la terre. Le plateau A étant maintenu au potentiel de la terre par le fil CD, un courant électrique s'établit entre les deux plateaux.

Le potentiel du plateau A est indiqué par un électromètre E. Si l'on interrompt en C la communication avec la terre, le plateau A se charge, et cette charge fait dévier l'électromètre. La vitesse de la déviation est proportionnelle à l'intensité du courant et peut servir à la mesurer. Mais il est préférable de faire cette mesure en compensant la charge que prend le plateau A de manière à maintenir l'électromètre au zéro. Les charges dont il est question ici sont extrêmement faibles; elles peuvent être compensées au moyen d'un quartz piézo-électrique Q dont une armature est reliée au plateau A et l'autre armature est à la terre. On soumet la lame de quartz à une tension connue produite par des poids placés dans un plateau H; cette tension est établie progressivement et a pour effet de dégager progressivement une quantité d'électricité connue pendant un temps qu'on mesure. L'opération peut être réglée de telle manière qu'il y ait à chaque instant compensation entre la quantité d'électricité qui traverse le condensateur et celle de signe contraire que fournit le quartz¹. On peut ainsi mesurer en *valeur absolue* la quantité d'électricité

¹ On arrive très facilement à ce résultat en soutenant le poids à la main et en ne le laissant peser que progressivement sur le plateau H, de manière à maintenir l'image de l'électromètre au zéro. Avec un peu d'habitude, on prend très exactement le tour de main nécessaire pour réussir cette opération. Cette méthode de mesure des faibles courants a été décrite par M. J. Curie dans sa Thèse.

qui traverse le condensateur pendant un temps donné, c'est-à-dire l'intensité du courant. La mesure est indépendante de la sensibilité de l'électromètre.

Radioactivité des composés d'urane. — En effectuant un certain nombre de mesures de genre on voit que la radioactivité des composés d'urane est un phénomène susceptible d'être mesuré avec une certaine précision. Elle varie peu avec la température, elle est à peine influencée par les oscillations de la température ambiante; elle n'est pas influencée par l'éclairement de la substance active, et elle ne semble pas subir de variation avec le temps. L'épaisseur de la couche de substance active employée a peu d'influence, pourvu que la couche soit continue et qu'elle ait une épaisseur supérieure à quelques dixièmes de millimètre.

L'étude de la conductibilité de l'air sous l'action des rayons de Becquerel a été faite par divers physiciens. Une étude très complète du sujet a été publiée par M. Rutherford; on en trouvera les résultats principaux dans le Rapport de M. Becquerel.

Pour un condensateur donné et une substance donnée, le courant augmente avec la différence de potentiel qui existe entre les plateaux, avec la pression du gaz qui remplit le condensateur et avec la distance des plateaux (pourvu que cette distance ne soit pas trop grande par rapport au diamètre). Toutefois, pour de fortes différences de potentiel, le courant tend vers une valeur limite qui est pratiquement constante. C'est le *courant de saturation* ou *courant limite*. De même pour une certaine distance des plateaux assez grande, le courant limite ne varie plus guère avec cette distance. C'est le courant obtenu dans ces conditions qui a été pris comme mesure de la radioactivité dans nos recherches (le condensateur étant placé dans l'air à la pression atmosphérique).

Les lois de la conductibilité produite dans l'air par les rayons de Becquerel sont les mêmes que celles trouvées avec les rayons de Röntgen; le mécanisme du phénomène paraît être le même dans les deux cas. La théorie de l'ionisation de l'air par les rayons de Röntgen ou de Becquerel rend bien compte des faits observés. Dans cet ordre d'idées, le nombre d'ions produits par seconde dans le gaz est d'autant plus grand que le rayonnement absorbé par ce gaz est plus fort. Pour obtenir le courant limite relatif à un rayonnement donné, il faut, d'une part, faire absorber intégralement ce rayonnement par le gaz, en employant une masse absorbante suffisante, et, d'autre part, utiliser pour la production du courant tous les ions produits, en établissant un champ électrique assez fort pour que le nombre d'ions qui se recombinent devienne une fraction insignifiante du nombre total des ions produits.

L'ordre de grandeur des courants que l'on obtient avec les composés d'urane est de 10^{-11} ampère pour un condensateur dont les plateaux avaient 8 cm de diamètre et 3 cm de distance.

Voici les nombres relatifs à divers composés d'urane; i désigne le courant en ampères:

	$i \cdot 10^{11}$
Uranium métallique (contenant un peu de carbone)	2,3
Oxyde d'urane noir U^2O^5	2,6
Oxyde d'urane vert U^2O^4	1,8
Acide uranique hydraté	0,6
Uranate de soude	1,2
Uranate de potasse	1,2
Uranate d'ammoniaque	1,3
Sulfate uraneux	0,7
Sulfate d'uranyle et de potassium	0,7
Azotate d'uranyle	0,7
Phosphate de cuivre et d'uranyle	0,9
Oxysulfure d'urane	1,2

Substances radioactives. — Il était naturel de se demander si d'autres corps que les composés d'urane émettent des rayons de Becquerel. M. Schmidt examina à cet effet beaucoup de substances et trouva qu'il existe un autre groupe de corps radioactifs, à savoir les composés du thorium¹. L'un de nous a fait en même temps un travail analogue, dont les résultats ont été publiés quand nous ne connaissions pas encore le travail de M. Schmidt. Dans ce travail, divers composés de presque tous les corps simples actuellement connus ont été passés en revue; les composés du thorium se sont montrés radioactifs.

Ce travail a établi que la radioactivité des composés d'urane et de thorium est une *propriété atomique*. Elle semble liée à la matière qui en est douée et ne peut être détruite ni par un changement d'état physique, ni par une transformation chimique. Les combinaisons chimiques ou les mélanges contenant de l'uranium et du thorium sont, en première approximation, d'autant plus actifs qu'ils contiennent une plus forte proportion de ces métaux; toute matière inactive ajoutée diminue l'activité, agissant à la fois comme matière inerte et comme matière absorbante.

La radioactivité des composés du thorium est du même ordre de grandeur que celle des composés d'urane; les oxydes des deux métaux ont une activité très analogue.

La radioactivité atomique est-elle un phénomène général? Il semble peu probable que cette propriété appartienne à une certaine espèce de matière à l'exclusion de toute autre. Cependant nos mesures permettent de dire que, pour les éléments actuellement considérés comme tels, y compris les plus rares et les plus hypothétiques, l'activité, si elle existe, est au moins 100 fois plus faible que pour l'uranium métallique dans notre appareil à plateaux.

¹ Schmidt, *Wied. Ann.*, t. LXV, 1898, p. 141.

Chaque élément a été examiné, quand c'était possible, dans diverses combinaisons chimiques. Ont figuré dans l'étude:

1° Tous les métaux et métalloïdes que l'on trouve facilement et quelques-uns des plus rares, produits purs provenant de la collection de M. Étard;

2° Les corps rares suivants: gallium, germanium, néodyme, praséodyme, niobium, scandium, gadolinium, erbium, samarium, rubidium, échantillons prêtés par M. Demarçay; yttrium, ytterbium avec nouvel erbium, holmium, échantillons prêtés par M. Urbain;

3° Un grand nombre de roches et de minéraux¹.

Le phosphore humide placé entre les plateaux du condensateur rend l'air conducteur. Toutefois, nous ne considérons pas ce corps comme radioactif à la façon de l'uranium et du thorium. En effet, le phosphore dans ces conditions s'oxyde et émet des rayons lumineux, tandis que les composés d'urane et de thorium sont radioactifs sans éprouver aucune modification appréciable par les moyens connus; de plus, le phosphore n'est actif ni à l'état de phosphore rouge, ni à l'état de combinaison.

Rayons thoriques. — Notre étude des composés du thorium a montré:

1° Que l'épaisseur de la couche active employée a une action considérable, surtout avec l'oxyde; le courant augmente avec l'épaisseur de la couche;

2° Que le phénomène n'est régulier que si l'on emploie une couche active mince ($\frac{1}{4}$ de millimètre); au contraire, quand on emploie une couche épaisse (6mm), on obtient des nombres oscillant entre des limites étendues, surtout dans le cas de l'oxyde;

3° Que les rayons thoriques sont bien plus pénétrants que les rayons uraniques, et que les rayons émis par l'oxyde de thorium sous couche épaisse sont bien plus pénétrants que ceux qu'il émet en couche mince².

Les particularités de la radiation thorique ont été récemment l'objet de publications très complètes. M. Owens³ a montré que la constance du courant n'est obtenue qu'au bout d'un temps assez long en appareil clos; il a également montré que, dans le cas des composés du thorium, le courant pouvait être fortement réduit par un courant d'air, ce qui n'a pas lieu pour les composés d'urane, et il a étudié en détail ce phénomène. Bientôt après, M. Rutherford⁴ a publié des résultats analogues et a fait l'hypothèse que les composés du thorium émettent non seulement des rayons analogues aux rayons uraniques, mais qu'ils émettent en plus une *émanation* constituée par des particules matérielles extrêmement ténues qui sont elles-mêmes radioactives.

¹ L'uranium métallique employé dans cette étude a été obligeamment donné par M. Moissan.

² Curie, *Comptes rendus*, t. CXXVI, avril 1898, p. 1101 [voir p. 43 — ed.].

³ Owens, *Phil. Mag.*, octobre 1899.

⁴ Rutherford, *Phil. Mag.*, janvier 1900.

Minéraux radioactifs. — Parmi les substances dont nous avons mesuré la radioactivité se trouvait un grand nombre de minéraux¹. Certains d'entre eux se sont montrés actifs. Voici les nombres obtenus, toujours avec le même appareil à plateaux:

	$\times 10^{11}$ en ampères
Pechblende de Johanngeorgienstadt	8,3
„ Joachimsthal	7,0
„ Pzibram	6,5
„ Cornwallis	1,6
Clévéite	1,4
Chalcolite	5,2
Autunite	2,7
Thorite	1,4
Orangite	2,0
Monazite	0,5
Xénotime	0,03
Eschynite	0,7
Fergusonite	0,4
Samarskite	1,1
Niobite	0,3
Carnotite	6,2

Tous ces minéraux contiennent de l'uranium et du thorium; leur activité n'a donc rien d'étonnant, mais l'intensité du phénomène pour certains minéraux est inattendue. Ainsi l'on trouve des pechblendes (minerais d'oxyde d'urane) qui sont quatre fois plus actives que l'uranium métallique; la chalcolite, phosphate cristallisé de cuivre et d'urane, est deux fois plus active que l'uranium; l'autunite, phosphate de chaux et d'urane, est aussi active que l'uranium. Or, d'après les considérations qui précèdent, aucun minéral n'aurait dû se montrer plus actif que l'uranium et le thorium. Pour éclaircir ce point, l'un de nous a préparé de la chalcolite artificielle par le procédé de Debray, en partant de produits purs. Cette chalcolite artificielle avait une activité tout à fait normale, étant donnée sa composition; elle était deux fois et demie moins active que l'uranium.

Il devenait dès lors très probable que, si la pechblende, la chalcolite, l'autunite ont une activité si forte, c'est que ces minéraux contiennent, en petite quantité, une substance fortement radioactive différente de l'uranium, du thorium et des corps simples actuellement connus.

Nous nous sommes proposé d'extraire cette substance de la pechblende et nous sommes en effet parvenus à montrer qu'il est possible, par les méthodes ordinaires de l'analyse chimique, d'extraire de la pechblende des substances

¹ Plusieurs échantillons de minéraux provenaient de la collection du Muséum et ont été obligeamment mis à notre disposition par M. Lacroix.

dont la radioactivité est environ *cent mille* fois plus grande que celle de l'uranium métallique.

Méthode de recherches. — Notre unique guide, dans cette recherche, était la radioactivité, et voici comment nous nous en servions: on mesurait l'activité d'un certain produit; on effectuait sur ce produit une séparation chimique; on mesurait l'activité de tous les produits obtenus, et l'on se rendait compte si la substance active cherchée était restée intégralement avec l'un d'eux ou bien si elle s'était séparée entre eux et dans quelle proportion. On avait ainsi une indication qui était analogue, jusqu'à un certain degré, à celle que pourrait fournir l'analyse spectrale. Pour avoir des nombres comparables, il faut mesurer l'activité des substances à l'état solide et bien desséchées. La difficulté principale de cette recherche provenait de ce que la pechblende est un minéral extrêmement compliqué, qui renferme en quantité notabale presque tous les métaux connus.

Gaz temporairement actif. — Nous avons reconnu d'abord que la pechblende chauffée dans le vide fournit des produits de sublimation très actifs, mais en très petite quantité. En recueillant les produits gazeux de la sublimation, nous avons obtenu un gaz, lequel, enfermé dans un tube de verre, agissait encore à l'extérieur comme un corps notablement radioactif. Pendant un mois, le rayonnement issu de ce gaz nous donna des impressions photographiques et provoqua la décharge des corps électrisés; puis l'activité diminua peu à peu, jusqu'à disparaître complètement. Au spectroscopie, le gaz actif montrait les raies de l'oxyde de carbone. La pechblende contient d'ailleurs de l'argon et de l'hélium. Nous nous sommes assurés que l'oxyde de carbone n'est pas radioactif. L'argon et l'hélium extraits de la fergusonite ne le sont pas non plus. Les conditions de production de ce gaz actif et la disparition de son activité restent à éclaircir.

Polonium, radium, actinium. — L'analyse de la pechblende par voie humide, avec le concours de la méthode exposée plus haut, a conduit à établir l'existence, dans ce minéral, de trois substances fortement radioactives, chimiquement différentes; le *polonium*, trouvé par nous¹; le *radium*, que nous avons découvert avec M. Bémont², et l'*actinium*, qui a été découvert par M. Debierne³.

Le *polonium* est une substance qui accompagne le bismuth que l'on retire de la pechblende et qui en est très voisine par ses propriétés analytiques. On obtient du bismuth de plus en plus riche en polonium par l'un des procédés de fractionnement suivants:

¹ *Comptes rendus*, t. CXXVII, juillet 1898, p. 175 [voir p. 46 — ed.].

² *Id.*, décembre 1898, p. 1215. [voir p. 57 — ed.].

³ *Id.*, t. CXXIX, octobre 1899, p. 593, et t. CXXX, avril 1900, p. 906.

1° Sublimation des sulfures dans le vide; le sulfure actif est beaucoup plus volatil que le sulfure de bismuth ordinaire;

2° Précipitation des solutions azotiques par l'eau; le sous-nitrate précipité est bien plus actif que le sel resté dissous;

3° Précipitation par l'hydrogène sulfuré d'une solution chlorhydrique extrêmement acide; les sulfures précipités sont considérablement plus actifs que le sel qui reste dissous.

Le *radium* est une substance qui accompagne le baryum retiré de la pechblende; il suit le baryum dans ses réactions et s'en sépare par différence de solubilité du chlorure dans l'eau, l'eau alcoolisée ou l'eau chlorhydrique. Nous le concentrons et le séparons du baryum par cristallisation fractionnée du chlorure, le chlorure de radium étant moins soluble que celui de baryum. Des trois nouvelles substances radioactives, le radium seul a été isolé à l'état de sel à peu près pur.

L'*actinium* accompagne certains corps du groupe du fer, contenus dans la pechblende; il semble surtout voisin du thorium, dont il n'a pas encore été séparé. Il n'est même pas facile de séparer le thorium actinifère des autres éléments du groupe du fer; les séparations sont généralement incomplètes. M. Debierne a utilisé les procédés de séparation suivants:

1° Précipitation des solutions bouillantes, légèrement acidulées par l'acide chlorhydrique, par l'hyposulfite de sodium en excès; la propriété radioactive se trouve presque entièrement retenue par le précipité;

2° Action de l'acide fluorhydrique et du fluorure de potassium sur les hydrates fraîchement précipités en suspension dans l'eau; la portion dissoute est peu active et l'on peut séparer le titane par ce procédé;

3° Précipitation de la solution neutre des azotates par l'eau oxygénée; le précipité entraîne le corps radioactif;

4° Précipitation des sulfates insolubles; chaque fois que l'on précipite un sulfate insoluble, le sulfate de baryte, par exemple, dans une solution renfermant du thorium actinifère, celui-ci est entraîné et le précipité est fortement radioactif. On retire ensuite le thorium actinifère en transformant les sulfates en chlorures et en précipitant la dissolution de ces derniers par l'ammoniaque. Ce procédé très simple est, comme on voit, très différent de ceux employés généralement pour la séparation des éléments.

Toutes les trois substances radioactives nouvelles se trouvent dans la pechblende en quantité absolument infinitésimale. Pour arriver à les obtenir à l'état de concentration actuel, nous avons été obligés d'entreprendre le traitement de plusieurs tonnes de résidus de minerai d'urane. Le gros traitement se fait dans une usine, il est suivi de tout un travail de purification et de concentration. Nous arrivons ainsi à extraire de ces milliers de kilogrammes de matière première quelques décigrammes de produits qui sont prodigieuse-

ment actifs par rapport au minéral dont ils proviennent. Il est bien évident que l'ensemble de ce travail est long, pénible et coûteux¹.

M. Giesel, à Brunswick, est aussi parvenu à préparer des produits de bismuth à polonium et de baryum radifère déjà très actifs.

D'après les recherches toutes récentes de MM. Debiérne, Giesel, Crookes, Becquerel², on peut, à la suite de certains traitements, extraire des sels d'urane une très petite quantité d'une substance très active, qui contient probablement de l'actinium. L'uranium ainsi purifié est moins actif qu'auparavant et peut-être même pourra-t-on faire disparaître ainsi toute sa radioactivité. L'uranium ne serait plus alors un élément radioactif. Ce fait, s'il était démontré, ne serait pas cependant en contradiction avec l'idée que la radioactivité est une propriété atomique; seulement, c'est à l'actinium qu'il faudrait reporter la propriété attribuée à l'uranium. S'il est difficile d'obtenir de l'uranium exempt d'actinium, alors on comprend que l'uranium doit avoir l'apparence d'un élément atomiquement radioactif. Le raisonnement qui a conduit à la découverte des nouvelles substances radioactives conserve sa validité.

Spectre du radium. — Il était de première importance de contrôler par tous les moyens possibles l'hypothèse, faite dans ce travail, de l'existence d'éléments nouveaux radioactifs. L'analyse spectrale a, dans le cas du radium, confirmé d'une façon complète cette hypothèse.

M. Demarçay a bien voulu se charger de l'examen de nos substances par les procédés rigoureux qu'il emploie dans l'étude des spectres photographiques.

Le concours d'un savant aussi compétent a été pour nous un grand bienfait, et nous le remercions bien sincèrement d'avoir bien voulu faire ce travail. Les résultats de l'analyse spectrale sont venus nous donner l'assurance, la certitude, alors que nous avions encore des doutes sur l'interprétation des résultats de notre travail.

Les premiers échantillons de chlorure de baryum radifères médiocrement actifs, examinés par M. Demarçay, lui montrèrent, en même temps

¹ Nous avons de nombreuses obligations et des remerciements à adresser à tous ceux qui nous sont venus en aide dans ce travail. Le Gouvernement autrichien a mis gracieusement à notre disposition la première tonne de résidu traitée (provenant de l'usine de l'État, de Joachimsthal en Bohême). L'Académie des Sciences de Paris, la Société d'Encouragement pour l'Industrie nationale, un donateur anonyme nous ont fourni les moyens de faire traiter une certaine quantité de produit. Notre excellent ami M. Debiérne a établi une méthode très avantageuse pour le traitement du résidu et a organisé ce traitement, qui a été effectué dans l'usine de la Société centrale de Produits chimiques. Cette Société a consenti à effectuer le traitement et une partie des fractionnements dans des conditions onéreuses pour elle.

A tous nous adressons nos remerciements bien sincères.

² Giesel, *Berichte der chem., Gesell.*, juin 1900; Crookes, *Proc. roy. Soc.*, mai 1900; Becquerel, *Comptes rendus*, juin et juillet 1900.

que les raies du baryum, une raie nouvelle (3814,7) d'intensité notable dans le spectre ultraviolet. Avec des produits plus actifs préparés ensuite, M. Demarçay vit la raie (3814,7) se renforcer; en même temps d'autres raies nouvelles apparurent et, dans le spectre, les raies nouvelles et celles du baryum avaient des intensités comparables. Dans les derniers échantillons examinés, le nouveau spectre domine et les trois plus fortes raies du baryum, seules visibles, indiquent seulement la présence de ce métal à l'état d'impureté. Ces échantillons peuvent être considérés comme formés de chlorure de radium à peu près pur.

Voici, d'après M. Demarçay¹, la liste des raies principales du radium pour la portion du spectre comprise entre $\lambda = 5000$ et $\lambda = 3500$. La force de chaque raie est indiquée par un chiffre, la plus forte raie étant marquée 16.

λ	Force	λ	Force
4826,3	10	4600,3(?)	3
4726,9	5	4533,5	9
4699,8	3	4436,1	8
4692,1	7	4340,6	12
4683,0	14	3814,7	16
4641,9	4	3649,6	12

Toutes les raies sont nettes et étroites, les trois raies 3814,7, 4683,0, 4340,6 sont fortes; elles atteignent l'égalité avec les raies les plus intenses actuellement connues. On aperçoit également dans le spectre deux bandes nébuleuses fortes.

La première, symétrique, s'étend de 4631,0 à 4621,9 avec maximum à 4627,5. La deuxième, plus forte, est dégradée vers l'ultraviolet; elle commence brusquement à 4463,7, passe par un maximum à 4455,2; la région du maximum s'étend jusqu'à 4453,4, puis une bande nébuleuse, graduellement dégradée, s'étend jusque vers 4390.

Dans la partie la moins réfrangible non photographiée du spectre, la seule raie notable est la raie 5665 (environ), bien plus faible cependant que 4826,3.

L'aspect général du spectre est celui des métaux alcalino-terreux; on sait que ces métaux ont des spectres de raies fortes avec quelques bandes nébuleuses.

M. Demarçay pense que le radium peut figurer parmi les corps ayant la réaction spectrale la plus sensible. Cependant il faut une activité initiale de 50 fois celle de l'uranium ordinaire environ, pour apercevoir nettement la raie principale du radium sur les spectres photographiques. Avec un électromètre sensible, on peut déceler la radioactivité pour des activités n'atteignant que

¹ *Comptes rendus*, t. CXXVII, 26 décembre 1898, p. 1218; t. CXXIX, 1899, p. 116, et t. CXXXI, 23 juillet 1900, p. 258.

le $\frac{1}{100}$ de celle de l'uranium ordinaire; on voit que, pour déceler la présence du radium, la radioactivité est un caractère plusieurs milliers de fois plus sensible que la réaction spectrale.

Le bismuth à polonium très actif, examiné par M. Demarçay, n'a encore donné au spectroscopie que les raies du bismuth. De même, le thorium à actinium très actif préparé par M. Debierne n'a encore donné que les raies du thorium.

Masse atomique du radium. — A mesure que nous obtenions des produits de baryum radifère de plus en plus riches en radium, l'un de nous a fait des déterminations successives de la masse atomique du métal contenu dans le chlorure de radium radifère exempt de toute impureté¹. On dosait le chlore par le chlorure d'argent en partant du chlorure anhydre. En chauffant le chlorure hydraté à 130°, il perd toute son eau de cristallisation et l'on n'obtient plus ensuite de variation de poids même en chauffant plusieurs heures le chlorure anhydre à 150°, ce qui indique qu'il n'y a aucune perte sensible de chlore. La masse atomique trouvée est sensiblement celle du baryum (137,5) pour les produits médiocrement actifs. Mais, pour des produits de plus en plus actifs, la masse atomique va en augmentant. Avec un produit riche en radium pour lequel les raies du radium ont une intensité plutôt un peu plus forte que celle du baryum, on a trouvé la masse atomique 174. Malheureusement, il a été impossible de faire une détermination sur le produit à peu près pur examiné au spectroscopie par M. Demarçay, parce que nous ne possédons de ce produit que quelques centigrammes, quantité trop faible pour faire un dosage. On peut donc seulement conclure que la masse atomique du radium est très supérieure à 174, et tout semble indiquer que ce corps est l'homologue supérieur du baryum dans la série des métaux alcalinoterreux.

La quantité de radium contenue dans les minerais d'urane est malheureusement prodigieusement faible. Pour obtenir quelques centigrammes de chlorure de radium pur et quelques décigrammes de produits moins concentrés, il a fallu faire traiter deux tonnes de résidu de minerai d'urane. Pour pouvoir faire une détermination de la masse atomique du radium pur et étudier les propriétés physiques et chimiques de ce nouveau métal, il faudrait pouvoir faire traiter encore un certain nombre de tonnes de résidu de minerai d'urane, ce qui nécessiterait de nouvelles dépenses.

Rayons émis par les nouvelles substances radioactives. — Le rayonnement de Becquerel émis par les nouvelles substances radioactives est considérablement plus intense que celui de l'uranium ordinaire; ce rayonnement est *au moins* 100 000 fois plus fort. Mais il n'est, à vrai dire, plus possible d'évaluer cette intensité de rayonnement par la méthode électrique décrite ci-dessus. En effet, avec ces substances très actives le courant entre les deux pla-

¹ *Comptes rendus*, t. CXXIX, p. 760, et t. CXXXI, p. 382; nov. 1899 et août 1900 [voir p. 80 et 93 — ed.].

teaux du condensateur continue à croître avec la différence de potentiel, et l'on n'atteint jamais le courant limite pour les tensions utilisées dans les mesures. De plus, pour les composés de radium et d'actinium, une partie du rayonnement est formée de rayons très pénétrants qui traversent le condensateur et les plateaux métalliques et qui ne sont nullement utilisés à ioniser l'air entre les plateaux.

Les rayons du polonium sont très intenses, mais très peu pénétrants; ils n'agissent pas dans l'air au delà d'une distance de quelques centimètres, et un écran solide même très mince n'en laisse passer qu'une très faible partie.

Le rayonnement du radium comporte à la fois des rayons peu pénétrants et des rayons très pénétrants. Ces derniers sont capables de traverser plusieurs centimètres de métal; ils peuvent aussi se propager dans l'air à plus de 1^m de distance du radium. Pour ces rayons pénétrants, le plomb, le platine sont les corps les plus opaques; l'aluminium, le verre, la paraffine sont relativement transparents.

L'action photographique des nouvelles substances est extrêmement rapide à petite distance. A grande distance on peut obtenir des *radiographies* avec le radium avec un temps de pose suffisant. On peut, par exemple, obtenir la radiographie d'une boîte de compas, d'un porte-monnaie, en utilisant quelques centigrammes de chlorure de baryum radifère placés dans une ampoule de verre. En opérant à 20^{cm} de distance, quelques heures de pose sont nécessaires; en opérant à 1^m de distance il faut une pose de quelques jours, mais les images sont alors très fines.

Le rayonnement des sels de baryum radifères augmente avec le temps à partir du moment où on les a préparés à l'état solide. Ce rayonnement semble tendre toutefois vers une certaine limite. Ce phénomène d'augmentation du rayonnement est particulièrement intense avec le chlorure de baryum radifère¹. Quand on évapore à sec une solution de chlorure de baryum radifère, l'activité du produit sec augmente d'abord très rapidement, puis plus lentement, et devient quatre ou cinq fois plus forte que l'activité initiale. Voici, par exemple, les activités que nous avons obtenues avec un produit faiblement actif (activité initiale 95 fois celle de l'uranium ordinaire): activité initiale 95, après 1 jour 120, après 2 jours 165, après 3 jours 210, après 9 jours 310, après 24 jours 381, après 300 jours 410. Quand on dissout du chlorure actif et qu'on le sèche de nouveau, l'activité initiale obtenue, immédiatement après desséchement, est d'autant plus faible que le sel est resté plus longtemps en solution, mais elle semble tendre vers une valeur constante qui est pratiquement atteinte lorsque le sel est resté quatre ou cinq jours en solution. On voit de quelles précautions il faut s'entourer lorsque l'on veut caractériser une de ces substances par son activité. Nous prenons généralement comme re-

¹ Ces phénomènes ont été décrits tout d'abord par M. G i e s e l (*Wied. Ann.*, t. LXIX, 1899, p. 91).

père le plus pratique l'activité initiale après desséchement d'une substance laissée quelques jours à l'état de dissolution.

Au contraire, l'activité des composés du polonium décroît lentement avec le temps (Giesel), et cette activité perdue ne semble pas pouvoir être régénérée sans faire, tout au moins, intervenir une action étrangère.

Les rayons des nouvelles substances radioactives ionisent l'air fortement. On peut, comme avec les rayons cathodiques et les rayons de Röntgen, provoquer facilement la condensation de la vapeur d'eau sursaturée.

Sous l'influence des rayons émis par les substances radioactives la distance explosive de l'étincelle entre deux conducteurs métalliques est diminuée¹.

Effets de fluorescence, effets lumineux. — Les rayons émis par les nouvelles substances radioactives provoquent la fluorescence de certains corps. Nous avons tout d'abord découvert ce phénomène en faisant agir le polonium et le radium au travers d'une feuille d'aluminium sur une couche de platinocyanure de baryum. Mais un grand nombre d'autres substances sont susceptibles de devenir phosphorescentes sous leur action; le papier de verre, etc. M. Becquerel a étudié l'action sur les sels d'urane, le diamant, la blende, etc. M. Bary² a montré que les sels des métaux alcalins et alcalino-terreux, fluorescents sous l'action des rayons lumineux et des rayons de Röntgen, sont également fluorescents sous l'action des rayons du radium.

Tous les composés du baryum radifère sont spontanément lumineux³, mais les sels halogénés, anhydres et secs, émettent une lumière particulièrement intense. Cette luminosité ne peut être vue à la grande lumière du jour, mais on la voit déjà facilement dans une demi-obscurité ou dans une pièce éclairée à la lumière du gaz. La lumière émise peut être assez forte pour que l'on puisse lire en s'éclairant avec un peu de produit. La lumière émise émane de toute la masse du produit, tandis que, pour un corps phosphorescent ordinaire, la lumière émane surtout de la partie de la surface qui a été éclairée. A l'air humide les produits radifères perdent en grande partie leur luminosité, mais ils la reprennent par desséchement (Giesel). La luminosité semble se conserver. Au bout de plus d'un an, aucune modification sensible ne semble s'être produite dans la luminosité des produits faiblement actifs, gardés en tubes scellés, à l'obscurité. Avec du chlorure de baryum radifère, très actif et très lumineux, la lumière change de teinte au bout de quelques mois, elle devient plus violacée et s'affaiblit quelque peu; en même temps le produit subit certaines transformations; mais en redissolvant le sel dans l'eau et en le séchant de nouveau on obtient la luminosité primitive.

¹ Elster et Geitel, *Wied. Ann.*, t. LXIX, p. 673.

² Bary, *Comptes rendus*, t. CXXX, 1900, p. 776.

³ Curie, *Société de Physique*, Paris, 3 mars 1899. — Giesel, *Wied. Ann.*, t. LXIX, p. 91.

Lorsqu'on est dans l'obscurité, on obtient un effet lumineux sur l'oeil fermé, en plaçant dans le voisinage de la paupière ou de la tempe un sel de baryum radifère très actif (Giesel). Cet effet s'obtient encore quand le sel radifère est recouvert d'aluminium. On peut attribuer cet effet à une phosphorescence des milieux de l'oeil sous l'action des rayons invisibles du radium.

Effets chimiques, coloration du verre. — Les radiations émises par les substances fortement radioactives sont susceptibles de provoquer certaines transformations, certaines réactions chimiques. Les rayons émis par les produits radifères exercent des actions colorantes sur le verre et la porcelaine¹.

La coloration du verre, généralement brune ou violette, est très intense; elle se produit dans la masse même du verre, elle persiste après l'éloignement du radium. Tous les verres se colorent en un temps plus ou moins long et la présence du plomb n'est pas nécessaire. Il convient de rapprocher ce fait de celui, observé récemment, de la coloration des verres des tubes à vide producteurs des rayons de Röntgen après un long usage.

M. Giesel a montré que les sels haloïdes cristallisés des métaux alcalins (sel gemme, sylvine) se colorent sous l'influence du radium, comme sous l'action des rayons cathodiques. M. Giesel montre que l'on obtient des colorations du même genre en faisant séjourner les sels alcalins dans la vapeur de sodium².

Le papier est altéré et coloré par les rayons du radium. Dans certaines circonstances il y a production d'ozone *dans le voisinage des composés très actifs*.

Les composés radifères semblent s'altérer avec le temps, peut-être sous l'action de leur propre radiation. Ainsi les cristaux de chlorure de baryum radifère sont incolores au moment où ils se déposent dans une solution; mais, au bout de quelques jours, ils prennent souvent une coloration tantôt jaune, tantôt d'un beau rose; cette coloration disparaît par dissolution. Le chlorure de baryum radifère dégage une odeur d'eau de Javel; le bromure dégage du brome. Ces transformations lentes s'affirment généralement quelque temps après la préparation du produit solide, lequel en même temps change d'aspect et de couleur en prenant une teinte jaune ou violacée. La lumière émise devient aussi plus violacée.

Les rayons du radium transforment le platinocyanure de baryum en une variété brune moins lumineuse; ils altèrent également le sulfate d'uranyle est de potasse en le faisant jaunir. Le platinocyanure de baryum transformé est régénéré partiellement par l'action de la lumière. Plaçons le radium au-dessous d'une couche de platinocyanure de baryum étalée sur du papier; le platinocyanure devient lumineux; si l'on maintient le système dans l'obscurité, le platinocyanure s'altère et sa luminosité baisse considérablement. Mais exposons le tout à la lumière, le platinocyanure est partiellement régénéré, et si l'on

¹ Curie, *Comptes rendus*, t. CXXIX, nov. 1899, p. 823. [voir p. 83 — ed.].

² Giesel, *Soc. de Phys. allemande*, janvier 1900.

reporte le tout dans l'obscurité la luminosité reparaît assez forte. On a donc, au moyen d'un corps fluorescent et d'un corps radioactif, réalisé un système qui fonctionne comme un corps phosphorescent à longue durée de phosphorescence.

M. Giesel a préparé du platinocyanure de baryum radifère. Quand ce sel vient de cristalliser, il a l'aspect du platinocyanure de baryum ordinaire, et il est très lumineux. Mais peu à peu le sel se colore spontanément et prend une teinte brune, en même temps que les cristaux deviennent dichroïques. A cet état le sel est bien moins lumineux, quoique sa radioactivité ait augmenté¹.

Action de la température. — Les substances radioactives conservent leurs propriétés après avoir été portées à une température élevée. L'uranium qui a été fondu au four électrique est radioactif. Le chlorure de baryum radifère qui a été fondu (vers 800°) est actif et lumineux. On sait qu'au contraire la phosphorescence acquise par éclaircissement s'épuise par l'action de la chaleur.

On a encore peu de renseignements sur la manière dont varie l'émission des rayons par les corps radioactifs avec la température. Nous savons cependant que l'émission subsiste aux basses températures. Nous avons placé dans l'air liquide un tube qui contenait du chlorure de baryum radifère. Nous avons constaté que la luminosité persiste dans ces conditions; il est difficile d'apprécier le degré de luminosité tant que le tube plonge dans l'air liquide, mais, au moment où l'on retire le tube de l'enceinte froide, il paraît bien plus lumineux qu'à la température ambiante. Nous avons remarqué aussi qu'à la température de l'air liquide le radium continue à exciter la fluorescence du sulfate d'uranyle et de potassium².

Action du champ magnétique sur les rayons de Becquerel. Rayons déviés et non déviés. — On a vu que les rayons émis par les substances radioactives ont un grand nombre de propriétés qui sont communes aux rayons cathodiques et aux rayons de Röntgen. Aussi bien les rayons cathodiques que les rayons de Röntgen ionisent l'air, agissent sur les plaques photographiques, excitent la fluorescence, n'éprouvent pas de réflexion régulière. Mais les rayons cathodiques diffèrent des rayons de Röntgen en ce qu'ils sont déviés de leur trajet rectiligne par l'action du champ magnétique et en ce qu'ils sont chargés d'électricité négative.

Les travaux de MM. Giesel, Meyer et v. Schweidler et Becquerel ont montré que les rayons des nouvelles substances radioactives sont déviés par le champ magnétique de la même façon que les rayons cathodiques.

On trouvera dans le Rapport de M. Becquerel un exposé complet de l'action du champ magnétique sur le rayonnement des corps radioactifs; nous

¹ Giesel, *Wied. Ann.*, t. LXIX, p. 91.

² Curie, *Société de Physique*, 2 mars 1900.

nous bornerons ici à donner quelques détails sur les expériences qui nous ont montré que ce rayonnement comprend deux groupes de rayons très distincts: les rayons déviés et les rayons non déviés¹. Ces expériences ont été faites par la méthode électrique.

Le corps radioactif A (fig. 2) envoie des radiations suivant la direction AD entre les plateaux P et P'. Le plateau P est maintenu au potentiel de 500 volts, le plateau P' est relié à un électromètre et à un quartz piézoélectrique. On mesure l'intensité du courant qui passe dans l'air sous l'influence des radiations. On peut à volonté établir le champ magnétique d'un électro-aimant normalement au plan de la figure dans toute la région EEEE. Si les rayons sont déviés, même faiblement, ils ne pénètrent plus entre les plateaux, et le courant est supprimé. La région où passent les rayons est entourée par les masses de plomb B, B', B'' et par les armatures de l'électro-aimant; quand les rayons sont déviés, ils sont absorbés par les masses de plomb B et B'.

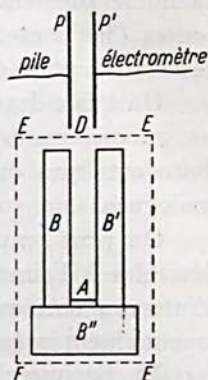


Fig. 2

Les résultats obtenus dépendent essentiellement de la distance AD du corps radiant A à l'entrée du condensateur en D. Si la distance AD est assez grande (supérieure à 7^{cm}), tous les rayons du radium qui arrivent au condensateur sont déviés et supprimés par un champ de 2500 unités. Si la distance AD est plus faible que 65^{mm}, une partie seulement des rayons est déviée par l'action du champ; cette partie est d'ailleurs déjà complètement déviée par un champ de 2500 unités, et la proportion de rayons supprimés n'augmente pas si l'on fait croître le champ de 2500 à 7000 unités.

La proportion des rayons non déviés est d'autant plus grande que la distance AD entre le corps radiant et le condensateur est plus petite. Pour des distances faibles; les rayons qui peuvent être déviés ne constituent plus qu'une très faible fraction du rayonnement total.

Voici, pour un échantillon de carbonate de baryum radifère, les résultats obtenus:

Dans la première ligne figure la distance AD en centimètres. En supposant égal à 100 le courant obtenu sans champ magnétique pour chaque distance, les nombres de la deuxième ligne indiquent le courant qui subsiste quand le champ agit. Ces nombres peuvent être considérés comme donnant le pourcentage des rayons non déviables.

Distance AD	7,1	6,9	6,5	6,0	5,1	3,4
Pour 100 rayons non déviés	0	0	11	33	56	74

¹ Curie, *Comptes rendus*, t. CXXX, 8 janvier 1900, p. 73.

Les rayons déviables sont les plus pénétrants.

Lorsque l'on tamise le faisceau au travers d'une lame absorbante (aluminium ou papier noir), les rayons qui passent sont tous déviables par le champ, de telle sorte qu'à l'aide de l'écran et du champ magnétique tout le rayonnement est supprimé dans le condensateur. Une lame d'aluminium de $\frac{1}{100}$ de millimètre d'épaisseur suffit pour supprimer tous les rayons non déviables, quand la substance est assez loin du condensateur; pour des distances plus petites (34^{mm} et 51^{mm}), deux feuilles d'aluminium de $\frac{1}{100}$ de millimètre sont nécessaires pour obtenir ce résultat.

On a fait des mesures semblables sur quatre substances radifères (chlorures ou carbonates) d'activité très différente; le rapport des activités des produits extrêmes était au moins de 300. Cependant, les résultats ont été très analogues.

On peut remarquer que, pour tous les échantillons, les rayons pénétrants déviables à l'aimant ne sont qu'une faible partie du rayonnement total; ils n'interviennent que pour une faible part dans les mesures où l'on utilise le rayonnement intégral pour produire la conductibilité de l'air.

M. Becquerel a montré que les composés de polonium préparés par nous n'émettent que des rayons non déviables. On peut étudier la radiation émise par le polonium par la méthode électrique. Quand on fait varier la distance AD du polonium au condensateur on n'observe d'abord aucun courant tant que la distance est assez grande; quand on rapproche le polonium, on observe que, pour une certaine distance, qui était de 4^{cm} pour l'échantillon étudié, le rayonnement se fait très brusquement sentir avec une assez grande intensité; le courant augmente ensuite régulièrement si l'on continue à rapprocher le polonium, mais le champ magnétique ne produit aucun effet. Il semble que le rayonnement non déviable du polonium soit délimité dans l'espace et dépasse à peine dans l'air une sorte de gaine entourant la substance sur l'épaisseur de quelques centimètres.

Le polonium de M. Giesel émet des rayons déviables par le champ magnétique, quand il est récemment préparé. De tous les échantillons de polonium préparés par nous, aucun n'en émettait. Nous ne connaissons pas la raison de cette différence.

M. Debierne a trouvé que l'actinium émet des rayons déviables par le champ magnétique; le rayonnement de l'actinium semble présenter une grande analogie avec celui du radium.

Il convient toutefois de faire des réserves générales importantes sur la signification des expériences que nous venons de décrire. Lorsque nous donnons la proportion des rayons déviés par l'aimant il s'agit seulement des radiations susceptibles d'actionner un courant dans le condensateur. En employant comme réactif des rayons de Becquerel, la fluorescence ou l'action sur les plaques photographiques, la proportion serait probablement très différente.

Il y a pour le moment, dans la définition de l'intensité d'une radiation, quelque chose de purement conventionnel et cette intensité n'a de sens que pour la méthode de mesure employée.

M. Villard a trouvé, en se servant de la plaque photographique, que les composés radifères émettent des rayons non déviables extrêmement pénétrants. Ces rayons non déviables n'agissent qu'à la longue sur la plaque photographique et, même avec le réactif de la plaque sensible, ils ne constituent qu'une faible partie du rayonnement total. Dans les expériences par la méthode électrique, ces rayons se faisaient peu ou ne se faisaient point sentir.

Le rayonnement du radium se compose donc: 1° des rayons non déviables par l'action du champ magnétique et très peu pénétrants; 2° d'une petite proportion de rayons non déviables très pénétrants; 3° de rayons déviables de diverses natures et, comme M. Becquerel l'a montré, d'autant moins déviables qu'ils sont plus pénétrants.

Pouvoir pénétrant des rayons non déviables. — L'absorption par les écrans de l'ensemble du rayonnement du radium a été étudiée par MM. Meyer et v. Schweidler, et par M. Becquerel qui en rend compte dans son Rapport. Nous ne nous occuperons ici que des particularités curieuses que l'on observe avec les rayons peu pénétrants du polonium et avec les rayons les plus absorbables du radium.

Tandis que, pour les rayons pénétrants du radium, le coefficient d'absorption va en décroissant quand croît l'épaisseur de matière traversée, au contraire, les rayons non déviables peu pénétrants sont d'autant plus absorbables que l'épaisseur de matière qu'ils ont déjà traversée est plus grande¹. Cette loi d'absorption singulière est contraire à celle que l'on connaît pour les autres rayonnements.

L'un de nous a employé pour cette étude notre appareil de mesures de la conductibilité électrique avec le dispositif suivant:

Les deux plateaux d'un condensateur PP et P'P' (*fig. 3*) sont horizontaux et abrités dans une boîte métallique BBBB en relation avec la terre. Le corps actif A, situé dans une boîte métallique épaisse CCCC faisant corps avec le plateau P'P', agit sur l'air du condensateur au travers d'une toile métallique T; les rayons qui traversent la toile sont seuls utilisés pour la production du courant, le champ électrique s'arrêtant à la toile. On peut faire varier la distance AT du corps actif à la toile. Le champ entre les plateaux est établi au moyen d'une pile; la mesure du courant se fait au moyen d'un électromètre et d'un quartz piézoélectrique.

En plaçant en A sur le corps actif divers écrans et en modifiant la distance AT, on peut mesurer l'absorption des rayons qui font dans l'air des chemins plus ou moins grands.

¹ Mme Curie, *Comptes rendus*, t. CXXX, 8 janvier 1900, p. 76 [voir p. 85 — ed.].

Le polonium se prête particulièrement à l'étude des rayons non déviables, puisque les échantillons que nous possédons, quoique très actifs, n'émettent pas du tout de rayons déviables.

Voici les résultats obtenus avec le polonium:

Pour une certaine valeur de la distance AT (4^{cm} et au-dessus), aucun courant ne passe: les rayons ne pénètrent pas dans le condensateur. Quand on diminue la distance AT, l'apparition des rayons dans le condensateur se fait d'une manière assez brusque, de telle sorte que, pour une petite diminution

de la distance, on passe d'un courant très faible à un courant très notable; ensuite le courant s'accroît régulièrement quand on continue à rapprocher le corps radiant de la toile T.

Quand on recouvre la substance radiante d'une lame d'aluminium laminé de $\frac{1}{100}$ de millimètre d'épaisseur, l'absorption produite par la lame est d'autant plus forte que la distance AT est plus grande.

Si l'on place sur la première lame d'aluminium une deuxième lame pa-

reille, chaque lame absorbe une fraction du rayonnement qu'elle reçoit, et cette fraction est plus grande pour la deuxième lame que pour la première, de telle façon que c'est la deuxième lame qui semble plus absorbante.

Dans le Tableau qui suit, nous avons fait figurer: dans la première ligne, les distances en centimètres entre le polonium et la toile T; dans la deuxième ligne, la proportion de rayons pour 100 transmise par une lame d'aluminium; dans la troisième ligne, la proportion de rayons pour 100 transmise par deux lames du même aluminium.

Distance AT	3,5	2,5	1,9	1,45	0,5
Pour 100 de rayons transmis par une lame	0	0	5	10	25
Pour 100 de rayons transmis par deux lames	0	0	0	0	0,7

Dans ces expériences la distance des plateaux P et P' était de 3^{cm} . On voit que l'interposition de la lame d'aluminium diminue l'intensité du rayonnement en plus forte proportion dans les régions éloignées que dans les régions rapprochées.

Cet effet est encore plus marqué que ne l'indiquent les nombres qui précèdent. Ainsi, la pénétration de 25 pour 100, pour la distance $0^{\text{cm}},5$, représente la moyenne de pénétration pour tous les rayons qui dépassent cette distance, les rayons extrêmes ayant une pénétration très faible. Si l'on ne

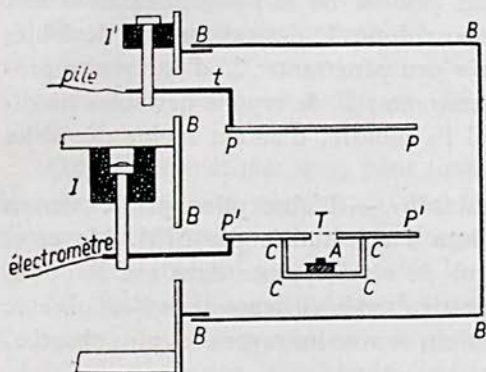


Fig. 3

recueillait que les rayons compris entre $0^{\text{cm}},5$ et 1^{cm} , par exemple, on aurait une pénétration plus grande encore. Et, en effet, si l'on rapproche le plateau P à une distance $0^{\text{cm}},5$ de P', la fraction de rayonnement transmise par la lame d'aluminium (pour $AT = 0^{\text{cm}},5$) est de 47 pour 100 et à travers deux lames elle est de 5 pour 100 du rayonnement primitif.

Les rayons non déviables du radium se comportent comme les rayons du polonium. On peut étudier les rayons non déviables seuls en renvoyant les rayons déviables de côté par l'emploi d'un champ magnétique. Voici les résultats d'une expérience de ce genre, toujours avec la même lame d'aluminium:

Distance AD (fig. 2)	6,0	5,1	3,4
Pour 100 de rayons transmis par Al	3	7	24

Ce sont encore les rayons qui allaient le plus loin dans l'air qui sont les plus absorbés par l'aluminium. Il y a donc une grande analogie entre les rayons non déviables du radium et ceux du polonium; les rayons déviables, au contraire, seraient de nature différente.

Si l'on utilise l'ensemble des rayons émis, le phénomène se trouve compliqué par la présence des rayons déviables et pénétrants, dont la loi d'absorption est différente. Si l'on observe à grande distance, ces derniers rayons dominent et l'absorption est faible; si l'on observe à petite distance, les rayons non déviables dominent et l'absorption est d'autant plus faible qu'on se rapproche plus de la substance; pour une distance intermédiaire, l'absorption passe par un maximum et la pénétration par un minimum.

Dans ces diverses expériences, l'écran est toujours placé à la même distance du radium.

Distance AD	7,1	6,5	6,0	5,1	3,4
Pour 100 de rayons transmis par Al	91	82	58	41	48

Devant des propriétés si particulières des rayons non déviables des corps radioactifs on pouvait se demander si ce sont bien là véritablement des rayons possédant la propagation rectiligne.

M. Becquerel a élucidé cette question par une expérience directe. Le polonium émettant les rayons non déviables était placé dans une cavité linéaire très étroite, creusée dans une feuille de carton. On avait ainsi une source linéaire de rayons. Un fil de cuivre de $1^{\text{mm}},5$ de diamètre était placé parallèlement en face du fil à une distance de 5^{mm} . Une plaque photographique était placée parallèlement à une distance de 8^{mm} au delà. Après une pose de 10 minutes, l'ombre géométrique du fil était reproduite d'une façon parfaite avec les dimensions prévues et une pénombre très étroite de chaque côté correspondant bien à la largeur de la source. La même expérience réussit également bien en

plaçant contre le fil une double feuille d'aluminium battu que les rayons sont obligés de traverser.

Il s'agit donc bien de rayons capables de donner des ombres géométriques parfaites. L'expérience avec l'aluminium montre que ces rayons ne sont pas fortement diffusés en traversant une lame d'aluminium battu et que cette lame n'émet pas en quantité importante des rayons secondaires analogues aux rayons secondaires des rayons de Röntgen.

Charge électrique des rayons du radium. — Les rayons cathodiques sont, comme l'a montré M. Perrin, chargés d'électricité négative¹. De plus, ils peuvent, d'après les expériences de M. Perrin et de M. Lenard,² transporter leur charge à travers des enveloppes métalliques réunies à la terre et à travers des lames isolantes. En tout point où les rayons cathodiques sont absorbés se fait un dégagement continu d'électricité négative. Nous avons constaté qu'il en est de même pour les rayons déviables du radium. Les rayons déviables du radium sont chargés d'électricité négative.

Étalons la substance radioactive sur l'un des plateaux d'un condensateur, ce plateau étant relié métalliquement à la terre; le second plateau est relié à un électromètre, il reçoit et absorbe les rayons émis par la substance. Si les rayons sont chargés, on doit observer une arrivée continue d'électricité à l'électromètre. Cette expérience, réalisée dans l'air, ne nous a pas permis de déceler une charge des rayons. Mais l'expérience ainsi faite n'est pas sensible. L'air entre plateaux étant rendu conducteur par les rayons, l'électromètre n'est plus isolé et ne peut accuser que des charges assez fortes.

Pour que les rayons non déviables ne puissent apporter de trouble dans l'expérience, on peut les supprimer en recouvrant la source radiante d'un écran métallique mince; le résultat de l'expérience n'est pas modifié³.

Nous avons sans plus de succès répété cette expérience dans l'air en faisant pénétrer les rayons dans l'intérieur d'un cylindre de Faraday en relation avec l'électromètre⁴.

¹ *Comptes rendus*, t. CXXI, p. 1130, et *Ann. de Ch. et de Phys.*, 7^e série, t. II, 1897, p. 433. Dans les expériences de M. Perrin, l'ordre de grandeur de la charge était de 10^{-6} coulomb pour une interruption de la bobine.

² L e n a r d, *Wied. Ann.*, t. LXIV, 1898, p. 279.

³ A vrai dire, dans ces expériences, on observe toujours une déviation à l'électromètre, mais il est facile de se rendre compte que ce déplacement est un effet de la force électromotrice de contact qui existe entre le plateau relié à l'électromètre et les conducteurs voisins; cette force électromotrice fait dévier l'électromètre, grâce à la conductibilité de l'air soumis au rayonnement du radium.

⁴ Le dispositif du cylindre de Faraday n'est pas nécessaire, mais il pourrait présenter quelques avantages dans le cas où il se produirait une forte diffusion des rayons par les parois frappées. On pourrait espérer ainsi recueillir et utiliser ces rayons diffusés, s'il y en a.

On pouvait déjà se rendre compte, d'après les expériences qui précèdent, que la charge des rayons du produits radiant employé était considérablement plus faible que celle des rayons cathodiques.

Pour constater un faible dégagement d'électricité sur le conducteur qui absorbe les rayons, il faut que ce conducteur soit bien isolé électriquement; pour obtenir ce résultat, il est nécessaire de le mettre à l'abri de l'air, soit en le plaçant dans un tube avec un vide très parfait, soit en l'entourant d'un bon diélectrique solide. C'est ce dernier dispositif que nous avons employé.

Un disque conducteur MM (fig. 4) est relié par la tige métallique t à l'électromètre; disque et tige sont complètement entourés de matière isolante iii ; le tout est recouvert d'une enveloppe métallique EEEE qui est en communication électrique avec la terre. Sur l'une des faces

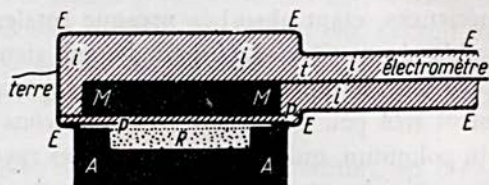


Fig. 4

du disque, l'isolant pp et l'enveloppe métallique sont très minces. C'est cette face qui est exposée au rayonnement du sel baryum radifère. R, placé à l'extérieur dans une auge en plomb¹. Les rayons émis par le radium traversent l'enveloppe métallique et la lame isolante pp et sont absorbés par le disque métallique MM. Celui-ci est alors le siège d'un dégagement continu et constant d'électricité négative que l'on constate à l'électromètre et que l'on mesure à l'aide du quartz piézoélectrique.

Le courant ainsi créé est très faible. Avec du chlorure de baryum radifère très actif formant une couche de $2\text{cm}^2,5$ de surface et de $0\text{cm},2$ d'épaisseur, on obtient un courant de l'ordre de grandeur de 10^{-11} ampère, les rayons utilisés ayant traversé, avant d'être absorbés par le disque MM, une épaisseur d'aluminium de $0\text{mm},01$ et une épaisseur d'ébonite de $0\text{mm},3$.

Nous avons employé successivement du plomb, du cuivre et du zinc pour le disque MM, de l'ébonite et de la paraffine pour l'isolant; les résultats obtenus ont été les mêmes.

Le courant diminue quand on éloigne la source radiante R, ou quand on emploie un produit moins actif.

Nous avons encore obtenu les mêmes résultats en remplaçant le disque MM par un cylindre de Faraday rempli d'air, mais enveloppé extérieurement par une matière isolante. L'ouverture du cylindre, fermée par la plaque isolante mince pp était en face de la source radiante.

¹ L'enveloppe isolante doit être parfaitement continue. Toute fissure remplie d'air allant du conducteur intérieur jusqu'à l'enveloppe métallique est une cause de courant dû aux forces électromotrices de contact utilisant la conductibilité de l'air sous l'action du radium.

Enfin nous avons fait l'expérience inverse, qui consiste à placer l'auge de plomb avec le radium au milieu de la matière isolante et en relation avec l'électromètre (*fig. 5*), le tout étant enveloppé par l'enceinte métallique reliée à la terre.

Dans ces conditions, on observe à l'électromètre que le radium prend une charge positive et égale en grandeur à la charge négative de la première expérience. Les rayons du radium traversent la plaque diélectrique mince *pp* et quittent le conducteur intérieur en emportant de l'électricité négative.

Les rayons non déviables du radium n'interviennent pas dans ces expériences, étant absorbés presque totalement par une épaisseur extrêmement faible de matière. La méthode qui vient d'être décrite ne convient pas non plus pour l'étude de la charge des rayons du polonium, ces rayons étant également très peu pénétrants. Nous n'avons observé aucun indice de charge avec du polonium, qui émet seulement des rayons non déviables, mais, pour la raison qui précède, on ne peut tirer de cette expérience aucune conclusion.

Ainsi, dans le cas des rayons déviables du radium, comme dans le cas des rayons cathodiques, les rayons transportent de l'électricité. Or, jusqu'ici on n'a jamais reconnu l'existence de charges électriques non liées à la matière. On est donc amené à se servir, dans l'étude de l'émission des rayons déviables du radium, de la même théorie que celle actuellement en usage dans l'étude des rayons cathodiques. Dans cette théorie balistique, qui a été formulée par Sir W. Crookes, puis développée et complétée par M. J.-J. Thomson, les ra-

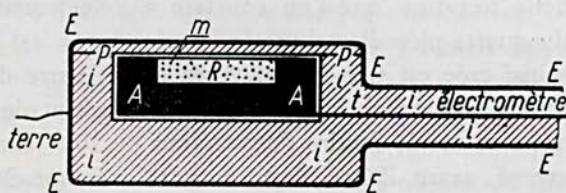


Fig. 5

yons cathodiques sont constitués par des particules matérielles extrêmement ténues qui sont lancées par la cathode avec une très grande vitesse et qui sont chargées d'électricité négative. On peut de même concevoir que le radium envoie dans l'espace des particules matérielles chargées négativement.

Un échantillon de radium qui serait isolé électriquement d'une façon parfaite se chargerait spontanément en peu de temps à un potentiel extraordinairement élevé. Dans l'hypothèse balistique, le potentiel augmenterait jusqu'à ce que la différence de potentiel avec les conducteurs environnants devînt suffisante pour empêcher l'éloignement des particules électrisées émises et amener leur retour à la source radiante.

Si le radium rayonne de la matière pondérable, il doit éprouver une perte de masse. Si le rapport de la charge électrique à la masse était le même que

dans l'électrolyse, le radium, dans notre expérience, perdrait trois équivalents en milligrammes en un million d'années. Cette perte ne pourrait être appréciée à la balance.

Radioactivité induite. — Nous avons trouvé que toute substance placée dans le voisinage du radium acquiert elle-même une radioactivité qui peut persister pendant plusieurs heures et même plusieurs jours après l'éloignement du radium. Le même effet a été observé bien plus faible avec le polonium¹.

La radioactivité induite croît avec le temps pendant lequel agit le radium jusqu'à une certaine limite. Après que l'on a retiré le radium, elle décroît de même d'abord rapidement, puis de plus en plus lentement, en suivant une loi asymptotique; elle tend à disparaître ou tout au moins à devenir très faible pour des temps suffisamment grands.

En exposant des disques métalliques divers à l'action du radium, on constate que la nature du métal ne semble pas avoir une importance prépondérante; on obtient des résultats de même ordre de grandeur avec le zinc, le laiton, le bismuth, le nickel, l'aluminium, le plomb.

Voici une courbe (fig. 6) qui montre comment varie la radioactivité induite en fonction du temps quand on a soustrait la substance activée à l'action du radium. Cette courbe se rapporte à un disque en zinc de 8^{cm} de diamètre, qui s'est activé étant placé en regard d'une surface de chlorure de baryum radifère de 4^{cm} de diamètre et à 3^{cm} de distance. L'échantillon de chlorure employé était environ 2000 fois plus actif que l'uranium; la radioactivité induite maximum est 20 fois celle de l'uranium ordinaire; elle décroît rapidement à partir du moment où l'on a éloigné le radium et, au bout de 2 heures, elle est devenue 8 fois plus faible.

On peut se demander si la radioactivité induite n'est pas due simplement au transport de la matière active sur la matière inactive voisine, ce transport pouvant se faire sous forme de poussières ou de vapeurs. Cette explication est improbable pour diverses raisons. Le transport de poussières ne semble pas compatible avec la disparition régulière et progressive de l'activité. D'autre part, on peut employer comme matière active le chlorure de baryum radifère, qui est soluble; on peut alors s'assurer que la radioactivité induite n'est pas

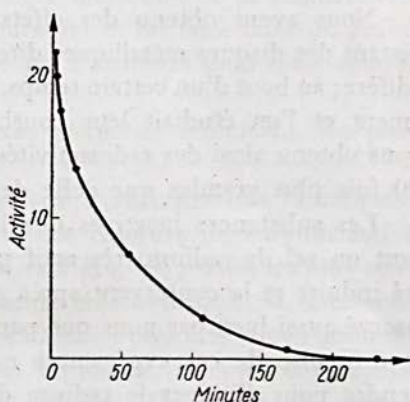


Fig. 6

¹ Curie, *Comptes rendus*, t. CXXIX, nov. 1899, p. 714. [voir p. 77 — ed.].

détruite par un lavage soigné, à l'eau, du disque activé; elle ne l'est pas davantage par un chauffage du disque, même à la température du rouge.

Il est possible de produire la radioactivité induite dans une substance en la soumettant à l'action du radium, ce dernier étant complètement enfermé dans une boîte métallique, et cela rend encore bien moins probable l'hypothèse d'un transport de matière ordinaire.

Les intensités des effets de radioactivité induite varient beaucoup avec l'échantillon du corps actif utilisé, à activité égale; le chlorure de baryum radifère produit plus fortement cet effet que le carbonate. Certains échantillons de chlorure produisaient des effets très irréguliers, l'activité induite variant d'un jour à l'autre dans de très fortes proportions sans que nous ayons pu reconnaître la cause de ces variations.

Nous avons aussi opéré en établissant des différences de potentiel entre le corps activant et le corps activé; les résultats irréguliers obtenus ne nous permettent pas de dire si le champ électrique modifie l'intensité de la radioactivité induite.

Nous avons obtenu des effets de radioactivité induite très intenses en mettant des disques métalliques directement au contact du chlorure de baryum radifère; au bout d'un certain temps, on retirait les disques, on les lavait soigneusement et l'on étudiait leur courbe de radioactivité à l'électromètre. Nous avons obtenu ainsi des radioactivités qui, à la première mesure, étaient jusqu'à 100 fois plus grandes que celle de l'uranium.

Les substances inactives que l'on introduit dans une dissolution renfermant un sel de radium très actif prennent généralement une forte radioactivité induite et la conservent après avoir été séparées du radium. Ce fait a été observé aussi bien par nous que par M. Giesel, qui a ainsi activé du bismuth¹. La difficulté de ces expériences consiste dans les soins extrêmes qu'il faut prendre pour éliminer le radium de la dissolution. L'expérience réussit très bien avec le bismuth.

M. Villard² a soumis à l'action des rayons cathodiques un morceau de bismuth placé comme anticathode dans un tube de Crookes; ce bismuth a été ainsi rendu actif, à vrai dire, d'une façon extrêmement faible, car il fallait huit jours de pose pour obtenir une impression photographique. On pourrait donc ainsi créer la radioactivité sans faire intervenir une substance radioactive.

M. Rutherford³ a obtenu des effets de radioactivité induite en se servant du thorium comme substance activante. Les résultats généraux sont les mêmes que ceux obtenus avec le radium. Cependant, d'après M. Rutherford, on obtient des effets particulièrement intenses en plaçant dans le voisinage du thorium un corps métallique de petite dimension (un fil de platine, par exemple) porté

¹ *Société de Physique de Berlin*, janvier 1900.

² Villard, *Société de Physique*, juillet 1900.

³ Rutherford, *Phil. Mag.*, février 1900.

à un potentiel négatif de 500 volts tandis que le thorium est à la terre. L'activité induite se concentre sur le fil. En traitant celui-ci par l'acide sulfurique et en évaporant à sec, M. Rutherford obtient un résidu bien plus actif que le thorium.

M. Debiegne¹ a obtenu des effets de radioactivité induite très intenses en utilisant comme substance activante l'actinium fortement actif, qui semble particulièrement propre à produire des effets de ce genre. Il a activé les sels de baryum en les maintenant en dissolution avec les sels d'actinium. Il a obtenu une activation encore plus grande en entraînant l'actinium dans un précipité de sulfate de baryte et en laissant les corps longtemps en contact. En retirant ensuite l'actinium comme il a été dit plus haut, le baryum reste actif si le contact a été suffisamment prolongé. On obtient ainsi des *sels de baryum activés*.

On peut se demander si les substances ainsi activées sont analogues aux substances radioactives ordinaires. Il y a là une question à résoudre d'une très grande importance étant donné le caractère atomique de la radioactivité ordinaire. M. Debiegne a su aborder cette question et lui faire faire un grand pas en utilisant le chlorure de baryum activé par l'actinium dont nous venons de parler.

Le *baryum activé* possède en partie, mais en partie seulement, les propriétés du *radium*.

Le *baryum activé* reste actif après diverses transformations chimiques; son activité est donc une propriété atomique. Le chlorure de baryum activé se fractionne comme du chlorure de baryum radifère, les parties les plus actives étant les moins solubles dans l'eau et l'acide chlorhydrique. M. Debiegne a ainsi obtenu par fractionnement des produits 1000 fois plus actifs que l'uranium ordinaire. Le chlorure sec est spontanément lumineux. Il émet des rayons semblables aux rayons du radium. Ces rayons sont déviés dans le champ magnétique et provoquent la fluorescence.

Cependant ce *baryum activé* se distingue du radium en ce qu'il ne possède pas le spectre du radium; à cette différence fondamentale vient s'en joindre une autre: l'activité du produit diminue avec le temps comme pour toutes les substances activées et, au bout de trois semaines, l'activité est trois fois plus faible qu'au début et continue à décroître.

M. Debiegne obtient donc ainsi une substance qui a des propriétés intermédiaires entre celles du baryum et celles du radium.

Les résultats obtenus par M. Debiegne sont très suggestifs au point de vue des idées que l'on peut se faire sur la nature des éléments chimiques.

Malheureusement, l'actinium qui sert dans ces recherches est encore plus rare que le radium dans les minerais d'urane, et la séparation en est en-

¹ *Comptes rendus*, t. CXXXI, 30 juillet 1900, p. 333.

core plus pénible. Pour obtenir la petite quantité de thorium à actinium très actifs dont il s'est servi, M. Debiérne a utilisé les produits provenant d'une tonne de résidu d'urane dans le traitement dont nous avons parlé plus haut.

Dissémination des poussières radioactives. — Lorsque l'on fait des études sur les substances fortement radioactives, il est nécessaire de prendre des précautions particulières si l'on veut pouvoir continuer à faire des mesures délicates. Les divers objets employés dans le laboratoire de Chimie ne tardent pas à être tous radioactifs et à agir sur les plaques photographiques au travers du papier noir. Les poussières, l'air de la pièce, les vêtements sont radioactifs. Dans la salle d'études physiques, l'air de la pièce devient conducteur; MM. Elster et Geitel attiraient dernièrement l'attention sur ce point¹. Dans le laboratoire où nous travaillons, le mal est arrivé à l'état aigu et nous ne pouvons plus avoir un appareil bien isolé.

Il y a donc lieu de prendre des précautions particulières pour éviter autant que possible la dissémination des poussières actives et pour éviter aussi les phénomènes d'activité induite.

Les objets employés en Chimie ne doivent jamais être emportés dans la salle d'études physiques, et il faut autant que possible éviter de laisser séjourner inutilement dans cette salle les substances actives. Avant de commencer ces études nous avons coutume, dans les travaux d'électricité statique, d'établir la communication entre les divers appareils par des fils métalliques isolés protégés par des cylindres métalliques en relation avec le sol, qui préservent les fils contre toute influence électrique extérieure. Dans les études sur les corps radioactifs, cette disposition est absolument défectueuse; l'air étant conducteur, l'isolement entre le fil et le cylindre est mauvais et la force électromotrice de contact inévitable entre le fil et le cylindre tend à produire un courant à travers l'air et à faire dévier l'électromètre. Il vaut mieux mettre tous les fils de communication à l'abri de l'air en les mettant, par exemple, au milieu de cylindres remplis de paraffine ou d'une autre matière isolante. Nous pensons qu'il y aurait aussi avantage à faire usage, dans ces études, d'électromètres *rigoureusement* clos.

Nature des rayons de Becquerel. — Le rayonnement de Becquerel est constitué par un mélange de rayons chargés d'électricité, déviables dans le champ magnétique, analogues aux rayons cathodiques, et de rayons non déviables par le champ magnétique et analogues aux rayons de Röntgen. Ce mélange n'a rien qui doive nous étonner. Dans les tubes à vide, les rayons X naissent à toute paroi frappée par les rayons cathodiques. D'autre part les rayons X en frappant les corps donnent naissance aux rayons secondaires étudiés par M. Sagnac, et ces rayons secondaires semblent formés eux-mêmes par un mélange de rayons non déviables et de rayons chargés d'électricité analogues

¹ *Ann. der Physik*, juillet 1900.

aux rayons cathodiques¹. L'analogie est donc grande entre l'émission spontanée des corps radioactifs et les rayons secondaires des rayons de Röntgen. Cette analogie nous avait frappés dès le début de cette étude, et depuis elle n'a fait que s'accroître.

Mais la spontanéité du rayonnement est une énigme, un sujet d'étonnement profond.

Quelle est la source de l'énergie des rayons de Becquerel?

Faut-il la chercher dans les corps radioactifs eux-mêmes ou bien à l'extérieur?

Conformément à ce qui vient d'être dit, on pourrait considérer les rayons de Becquerel comme une émission secondaire due à des rayons analogues aux rayons X traversant tout l'espace et tous les corps.

Si l'émission, prise dans son ensemble, n'était pas une émission secondaire, cela pourrait être encore vrai pour l'un des deux groupes de rayons; on pourrait considérer comme rayons primaires soit les rayons non déviés, soit les rayons déviés.

Dans le premier cas, l'énergie pourrait être empruntée au milieu ambiant sous forme de chaleur, mais une semblable hypothèse serait en contradiction avec le principe de Carnot.

Dans le second cas, on pourrait avoir recours à l'hypothèse balistique telle qu'elle a été édictée par Sir W. Crookes et M. J.-J. Thomson pour l'explication des propriétés des rayons cathodiques. Le radium émettrait d'une façon continue des particules extrêmement petites chargées d'électricité négative. L'énergie utilisable emmagasinée sous forme d'énergie potentielle se dissiperait peu à peu, et cette manière de voir conduirait nécessairement à ne plus admettre l'invariabilité de l'atome.

¹ Curie et Sagnac, *Comptes rendus*, t. CXXX, p. 1013; 9 avril 1900.