

ALICE ou la percée des ions lourds

René Bimbot



Édition électronique

URL : <https://journals.openedition.org/histoire-cnrs/8402>

DOI : [10.4000/histoire-cnrs.8402](https://doi.org/10.4000/histoire-cnrs.8402)

ISSN : 1955-2408

Éditeur

CNRS Éditions

Édition imprimée

Date de publication : 3 octobre 2008

ISBN : 978-2-271-06676-3

ISSN : 1298-9800

Référence électronique

René Bimbot, « ALICE ou la percée des ions lourds », *La revue pour l'histoire du CNRS* [En ligne], 22 | 2008, mis en ligne le 03 octobre 2010, consulté le 20 mai 2021. URL : <http://journals.openedition.org/histoire-cnrs/8402> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/histoire-cnrs.8402>

Ce document a été généré automatiquement le 20 mai 2021.

Comité pour l'histoire du CNRS

ALICE ou la percée des ions lourds

René Bimbot

Pré-accélérer les ions lourds pour mieux les « éplucher »

- 1 Le cyclotron à énergie variable à ions lourds, dont la construction avait été prévue par Irène Joliot-Curie dès la création du laboratoire de physique nucléaire d'Orsay, était entré en fonctionnement en 1966 [1, 2]. Cet accélérateur était doté d'une source d'ions conventionnelle, placée en son centre, capable de produire des ions positifs multichargés (plusieurs fois chargés) à partir d'atomes gazeux. Pour ce faire, le gaz circulant dans la source était bombardé en permanence par des électrons oscillant entre deux électrodes au sein d'un champ magnétique puissant. Ces collisions arrachaient des électrons aux atomes (initialement neutres) constituant ce gaz, puis aux ions résultant de collisions précédentes, ce qui conduisait à des charges de plus en plus élevées. Cependant, la principale limitation de l'accélérateur provenait de la faible valeur de la charge maximale des ions ainsi produits. En effet, pour que des ions lourds puissent engendrer des réactions nucléaires dans tous les noyaux-cibles, il est essentiel qu'ils possèdent une énergie suffisante. Comme l'énergie finale des particules issues d'un cyclotron est directement proportionnelle au carré de leur charge, les ions doivent être produits à la source dans un état de charge assez élevé (voir l'encadré). Pour la machine d'Orsay, cette condition n'était remplie que pour les éléments les plus légers, jusqu'au néon. Au-delà, la charge maximale des ions issus de la source (typiquement 4+) conduisait à des énergies beaucoup trop faibles pour qu'ils soient utilisables pour des expériences de physique nucléaire.
- 2 Conscient de cette difficulté, Robert Basile, qui venait de terminer une thèse sous la direction d'Irène Joliot, avait proposé, dès 1958, une solution innovante susceptible de lui apporter un remède¹. Il s'agissait de pré-accélérer des ions de faible charge dans un petit accélérateur, et de les injecter au centre du cyclotron. En ce point, ce faisceau de faible énergie devait traverser une cible mince, ce qui conduirait à un épluchage total ou partiel des ions, c'est-à-dire à la perte de tout ou partie de leurs électrons. Le gain en charge serait d'autant plus grand qu'ils seraient plus lourds. Ainsi, les ions d'azote passeraient de la charge 2+ à la charge 7+, et les ions d'argon de la charge 4+ à un état de charge compris entre 10+ et 13+. Après accélération par le cyclotron, ces gains de

charge se traduiraient par des gains considérables en énergie (227 MeV au lieu de 74 pour l'azote, 275 MeV pour l'argon au lieu de 26)².

- 3 Ce phénomène d'épluchage – ou *stripping* – des ions était connu depuis de nombreuses années³ et était déjà exploité, notamment dans les accélérateurs linéaires d'ions lourds construits ou en construction à l'époque, comme le « Hilac » de Berkeley. Mais il n'avait jamais été mis en œuvre pour la production d'ions multichargés destinés à être accélérés dans un cyclotron.
- 4 Bien qu'elle ait été favorablement accueillie par le groupe d'études responsable de la conception du cyclotron, cette proposition ne figure pas dans le rapport⁴ rédigé par ce groupe en 1960. Cependant, elle est publiée par son auteur en 1961 [3], et rapidement mise en œuvre par le Service « Électronique accélérateurs » responsable de la construction des accélérateurs du laboratoire.

Le Linac

- 5 Après étude de différents types de machines susceptibles de jouer le rôle d'injecteur, le choix se porte sur un petit accélérateur linéaire. Un jeune ingénieur du laboratoire, Claude Bieth, en réalise plusieurs maquettes qui seront utilisées pour sa mise au point. Le projet est finalisé en 1966 et sa construction est confiée à la société française CGRMeV. Le Linac mesurera une dizaine de mètres de longueur et comportera 56 électrodes. Comme dans tous les accélérateurs linéaires, les dimensions de ces électrodes augmenteront régulièrement depuis la source d'ions jusqu'à la sortie de la machine. Les ions seront produits par une source classique extérieure placée sur une plateforme portée à une haute tension de 150 kV par rapport à l'entrée du « linéaire ». De cette façon, ils seront injectés avec une vitesse suffisante pour pouvoir être pris en charge par cet accélérateur.
- 6 Le Linac est livré fin 1967. Sa mise en œuvre prendra encore deux ans. En 1969, lors de la réunion scientifique de La Plagne [4], la description de cette machine et des perspectives ouvertes par son couplage au cyclotron à ions lourds occupe une large part des débats. La même année, les ions pré-accelérés sont conduits jusqu'au cyclotron et injectés de façon que leur trajectoire passe en son centre. En ce point, leur épluchage est assuré par une cible mince de carbone. Ce matériau a été choisi après une étude poussée des meilleures conditions d'épluchage des ions aux vitesses qui leur sont données par le Linac [5].
- 7 La machine associant l'accélérateur linéaire au cyclotron à énergie variable est baptisée Alice⁵. Elle constitue le premier ensemble au monde couplant deux accélérateurs différents. Par rapport au cyclotron seul, la gamme des ions lourds pouvant être accélérés à des énergies exploitables – c'est-à-dire permettant de provoquer des réactions nucléaires dans tous les noyaux-cibles du tableau de Mendeleïev – a été considérablement accrue, ce qui constitue une avancée technique très importante. Mais le réel succès de cette machine provient du fait que cette gamme s'étend bien au-delà de l'argon, jusqu'au krypton. Cette propriété la propulse en tête de tous les accélérateurs de l'époque. Mieux encore, elle permet aux physiciens de s'attaquer à une question d'actualité brûlante, la recherche des éléments superlourds.

Un îlot d'éléments superlourds ?

- 8 Les éléments chimiques présents sur la Terre, dans la nature, vont de l'hydrogène, de numéro atomique Z égal à 1 et de masse atomique A égale à 1, à l'uranium ($Z = 92$, $A = 238$ ⁶). Les éléments stables (possédant au moins un isotope non radioactif) ont été identifiés au fil des siècles, classés en 1869 par Mendeleïev dont le célèbre tableau a été

complété au XX^e siècle par la découverte des derniers d'entre eux, ainsi que des éléments naturels des familles radioactives. À cette liste presque complète des 92 premiers éléments, sont venus s'ajouter, en 1937, le technétium ($Z = 47$), en 1945, le prométhéum ($Z = 61$) également radioactifs, et surtout, à partir de 1940, les éléments « transuraniens », de numéros atomiques supérieurs à 92, synthétisés par les chercheurs américains et soviétiques. En 1970, au moment où Alice entre en fonctionnement, la série des transuraniens s'arrête à l'élément 105 (appelé aujourd'hui « dubnium »), qui a été annoncé en 1967 à Dubna et qui vient d'être formellement identifié à Berkeley. Ces éléments sont tous radioactifs et leurs périodes de demi-vie sont de plus en plus courtes (on dit aussi que leur stabilité diminue) à mesure que s'accroît leur numéro atomique Z – et donc leur masse A . En effet, Z représente aussi le nombre de protons du noyau, et, comme ces particules sont chargées positivement, la répulsion électrique qu'ils exercent entre eux augmente en même temps que leur nombre. Peu à peu, la force nucléaire (appelée interaction forte) qui assure la cohésion de l'ensemble du noyau devient trop faible pour résister à cette poussée dont l'effet est inverse. On pourrait donc penser que, vers $Z = 105$, l'on approche de la limite en Z au-delà de laquelle les noyaux perdront toute cohésion et ne pourront plus exister.

- 9 Mais un autre phénomène vient compliquer cette situation. C'est la structure « en couches » des noyaux, qui résulte elle-même des lois de la physique quantique. Cette propriété se manifeste par un renforcement de la stabilité de ces édifices pour des nombres de neutrons ou de protons qui ont été qualifiés de « magiques ». Pour les neutrons, ces nombres sont égaux à 2, 8, 20, 28, 50, 82 et 126. Pour les protons les mêmes nombres magiques ont été mis en évidence jusqu'à 82, et tout porte à croire que la stabilité des noyaux se trouvera également renforcée au voisinage de $Z = 126$. Vers la fin des années 1960, les théoriciens se sont emparés de cette question et prévoient que ce renforcement pourrait apparaître dès $Z = 114$. Autour de ces valeurs pourrait exister un véritable « îlot de stabilité » s'étendant sur quelques unités – voire une dizaine – de valeurs de Z et environ le triple de valeurs de A . Le terme d'éléments lourds étant généralement appliqué à ceux dont la masse est nettement supérieure à 150, ces éléments de masse supérieure à 300 ont reçu le nom d'éléments superlourds.

L'expérience « Superlourds »

- 10 C'est dans ce contexte que la possibilité d'accélérer des faisceaux de krypton ($Z = 36$) à des énergies de l'ordre de 450 MeV prend toute son importance. En effet, des noyaux de krypton 84 de cette énergie peuvent théoriquement fusionner avec des cibles d'uranium⁷. Ces noyaux de fusion regrouperaient tous les protons et neutrons du projectile et de la cible, ce qui leur conférerait un numéro atomique $Z_{\text{NC}} = 36 + 92 = 128$, et une masse égale à $M_{\text{NC}} = 238 + 84 = 322$. Selon le schéma habituel des réactions procédant par noyau composé (voir [2]), ils évacueraient leur excédent d'énergie en émettant quelques neutrons (ou protons), mais le noyau final résulterait de la fusion et conserverait des chances non négligeables d'appartenir à l'îlot de stabilité prévu par la théorie⁸.
- 11 À l'Institut de physique nucléaire, dès 1968, une équipe importante rassemblant des chercheurs issus des groupes de Michel Riou et Marc Lefort s'est donc constituée pour préparer ce qui s'annonce comme le programme de recherche prioritaire qui sera lancé sur l'accélérateur dès son démarrage. La réalisation de cette expérience sera délicate, mais son principe est simple. Il s'agit de :
- créer des noyaux de fusion par collision des ions de krypton avec une cible d'uranium ;
 - les séparer des ions de krypton qui n'ont pas réagi, grâce à une déviation électrostatique ;

- utiliser l'aimant d'analyse présent sur l'une des lignes de faisceau (voir [2]) pour les conduire, de façon sélective, jusqu'à un détecteur placé à la sortie de cet aimant ;
 - et déterminer leur masse M en mesurant à la fois leur énergie cinétique E_c dans ce détecteur et le temps t mis à parcourir la distance d le séparant de la cible⁹. L'identification d'une masse supérieure à 300 signerait la présence d'un noyau superlourd.
- 12 Le premier faisceau de krypton disponible pour la physique est délivré par l'accélérateur Alice en mars 1970. C'est une première mondiale. Après une période de quelques mois consacrée aux tests du matériel et à l'étalonnage des détecteurs, l'expérience « Superlourds » peut commencer. Elle a acquis le statut de première priorité de l'Institut de physique nucléaire. Cependant, la très faible intensité du faisceau de krypton, les instabilités de l'accélérateur et ses nombreuses pannes rendent sa réalisation très difficile. Il faut dire que les objectifs de physique contraignent cette machine toute nouvelle à fonctionner d'emblée à la limite de ses possibilités, alors qu'une période de rodage aurait été la bienvenue.
- 13 Il faudra attendre deux années presque entièrement dédiées à l'expérience « Superlourds » pour que celle-ci ait accumulé suffisamment de données pour aboutir à une conclusion. Malheureusement, celle-ci est négative : aucun noyau de masse voisine de 300 n'a été observé, et la limite ainsi posée pour la production de ces noyaux par fusion se situe bien au-dessous des prévisions de la théorie. Ce résultat est décevant. On ne peut même pas en conclure que l'îlot de stabilité recherché n'existe pas, car il est également possible que ce soit la méthode choisie pour tenter de produire les noyaux superlourds qui soit défailante.
- 14 Cette seconde hypothèse est alors testée en tentant de réaliser la fusion du krypton avec des cibles plus légères que l'uranium de façon à produire des noyaux dont l'existence est connue. Et ici, une réponse non ambiguë est obtenue : lorsqu'un noyau de krypton entre en collision avec un noyau lourd, contrairement à ce qui se passe avec des projectiles plus légers (l'argon, par exemple), la fusion ne se produit pas¹⁰ ! Après être restés en contact pendant un temps assez bref, les deux partenaires de la collision se séparent de nouveau, sous l'influence de la très forte répulsion électrique qu'ils exercent l'un sur l'autre. Les éléments superlourds ne peuvent donc pas être synthétisés par cette méthode, du moins pas avec l'accélérateur Alice, dont les faisceaux ont une intensité trop modeste. La question de leur existence reste donc ouverte. De ce point de vue, bien qu'elle ait parfaitement fonctionné, l'expérience « Superlourds » est un échec. Celui-ci n'est pas imputable aux chercheurs d'Orsay, mais à la nature, aux lois de la physique... La déception n'en est pas moins grande chez les physiciens.
- 15 Cependant, cette déconvenue s'accompagne d'une consolation. Les nouvelles réactions nucléaires qui prennent la place de la fusion lorsque les projectiles deviennent très lourds, étaient inconnues jusque-là¹¹. Leur mise en évidence constitue, en elle-même, une découverte. Celle-ci est, certes, moins importante que ne l'aurait été celle d'un îlot d'éléments superlourds, mais elle ouvre cependant des perspectives très intéressantes. En effet, leur étude révélera rapidement que ces réactions nucléaires sont susceptibles d'apporter des informations très précieuses sur la dynamique des collisions, c'est-à-dire sur l'écoulement des flux de matière nucléaire entre deux noyaux en contact [6-8]. Pendant quelques années, partout dans le monde, l'attention des physiciens des ions lourds va se focaliser sur l'étude de ces nouvelles réactions qui recevront les noms de « quasi-fissions » ou de « transferts très inélastiques ». Grâce aux faisceaux d'Alice, les

chercheurs d'Orsay seront au premier plan de ces recherches. En 1975, cette percée se traduira par l'organisation, à Gif-sur-Yvette d'un atelier consacré à cette thématique¹². Bien qu'informel, celui-ci marque une étape cruciale dans l'histoire de la physique des ions lourds française, son entrée au premier plan international.

Conclusion

- 16 Les six années qui se sont écoulées entre la réunion de La Plagne [2, 4] et celle de Gif-sur-Yvette ont vu s'opérer un véritable retournement de situation. Grâce à l'innovation technique constituée par l'adjonction du Linac en tant qu'injecteur, le cyclotron à énergie variable, machine de second plan, est devenu le premier accélérateur au monde capable de produire des faisceaux de krypton utilisables pour la physique nucléaire.
- 17 Du point de vue technologique, Alice deviendra un modèle, et par la suite, les accélérateurs d'ions lourds en cascade, avec épluchage intermédiaire des ions vont se multiplier dans le monde. Du point de vue scientifique, ces six années ont vu aussi s'écrouler un rêve, celui de découvrir à Orsay l'îlot d'éléments superlourds prévu par la théorie, et dont la mise en évidence aurait constitué un événement majeur dans le domaine de la structure nucléaire. On sait aujourd'hui que cette découverte n'était pas chose aisée et, près de quarante ans plus tard, cette question est toujours d'actualité¹³. Cependant, les faisceaux inédits d'Alice ont permis une percée importante dans le domaine des mécanismes de réactions et permis aux physiciens français des ions lourds de rejoindre le groupe des leaders internationaux de cette discipline.
- 18 Dans les années qui suivront, en enrichissant constamment la palette d'ions accélérés par Alice, et en développant un projet de « Grand accélérateur national d'ions lourds », le Ganil, ces physiciens vont s'efforcer de conserver ce statut [8].

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Bimbot R. « Les années Joliot (1956-1958) », in *La revue pour l'histoire du CNRS*, n°16, printemps 2007, pp. 41-45.
- [2] Bimbot R. « IPN : un cyclotron pour les ions lourds », in *La revue pour l'histoire du CNRS*, n°20, printemps 2008, pp. 44-48.
- [3] Basile R. « Projet d'injection d'ions très lourds dans le cyclotron de 2 mètres d'Orsay ». *Le Journal de Physique et le Radium, Physique Appliquée*, 22(1961)27A.
- [4] Compte-rendu de la session d'études « Sur la physique et la production des ions lourds », La Plagne 17-21 mars 1969, Rapport Lycen 6913, Institut de physique nucléaire de Lyon, Villeurbanne (1969).
- [5] Baron E., « Contribution à l'étude des échanges de charge des ions lourds traversant les solides », thèse, Orsay (1975).
- [6] Bimbot R. « Alice ou l'essor des ions lourds », Vidéo de 28' réalisée par D. Garabédian (ENS Production) et S. Guyon (SAV, Orsay), distribuée par le SFRS, Paris (1989).

[7] Bimbot R. « Histoire d’Alice, l’accélérateur d’ions lourds », Vidéo de 52’ réalisée par D. Garabédian (ENS Production), distribuée par le SFRS, Paris (1994).

[8] Bimbot R. « Les succès d’Alice et la genèse de Ganil ». Article en préparation pour *La revue pour l’histoire du CNRS*.

NOTES

1. Cette méthode avait été suggérée dès 1952 par Tobias (*Phys. Rev.* 85 (1952) 764 et *Bull. Am. Phys. Soc.* 27, XII, 8, 16), mais Robert Basile n’avait probablement pas eu connaissance de ces publications.
2. Ces gains sont calculés par rapport aux ions de charge 4+ fournis par les sources classiques.
3. Il avait été notamment étudié par Stephens et Walker en 1954 (*Phil. Mag.* (GB) 45 (1954) 543) pour des ions d’azote.
4. « Le cyclotron à énergie variable pour l’accélération d’ions lourds. Projet et études ». Publication interne du Laboratoire de physique nucléaire d’Orsay (Archives de l’institut de physique nucléaire d’Orsay).
5. Accélérateur linéaire injectant dans le cyclotron à énergie variable (le V terminal a été abandonné).
6. L’uranium 235 est un autre isotope stable de l’uranium.
7. Il s’agissait de créer des secteurs de champ fort et de champ faible, nécessaires pour maintenir une focalisation du faisceau en cours d’accélération.
8. MeV = million d’électron-Volts.
9. Brun C., Le Beyec Y., Lefort M. *Isotopes légers du polonium produits par réactions nucléaires par ions de carbone 12 sur le platine*. *C. R. Acad. Sci.* 261 (1965) 1667.
10. Afin de simplifier la mesure du nombre d’ions atteignant ces cibles, celles-ci seront le plus souvent placées au fond d’un cylindre de Faraday permettant de déterminer directement la charge électrique collectée pendant une irradiation donnée, d’où le nombre d’ions, connaissant la charge de chacun d’entre eux.
11. En fait, des indices de l’existence de ces réactions avaient déjà été signalés, y compris à Orsay, mais ce sont les expériences utilisant des faisceaux de krypton qui marquèrent leur consécration [6-8].
12. “Workshop on the Effects of Dynamics in Collisions between Complex Nuclei.” Atelier international organisé par R.Bimbot et M. Lefort, Gif-sur-Yvette, mai 1975.
13. En effet, après la découverte de l’élément 106 (le seaborgium), à Berkeley, en 1974, il fallut attendre la construction d’un puissant accélérateur linéaire d’ions lourds, l’Unilac de Darmstadt et d’un dispositif spécialement dédié à cette recherche pour que le cheminement vers les superlourds se poursuive dans ce laboratoire allemand. Entre 1981 et 1997, les éléments 107 à 112 y furent successivement découverts. Plus récemment, la mise en évidence des éléments 114, 116 et 118 a été annoncée à Dubna (Russie), mais des expériences de confirmation doivent être réalisées avant que l’existence de ces noyaux superlourds soit considérée comme effectivement établie. De grands laboratoires internationaux, dont en France le Ganil, sont actuellement engagés dans cette recherche.

RÉSUMÉS

En 1966, le CEV, un cyclotron spécialement conçu pour les ions lourds, entrait en fonctionnement à l'institut de physique nucléaire d'Orsay. Quatre années plus tard, un accélérateur linéaire, agissant en tant qu'injecteur, lui est adjoint. Cet exploit technologique aboutit à la constitution de l'ensemble accélérateur Alice, première machine au monde capable d'accélérer des ions très lourds comme le krypton. Les découvertes effectuées grâce à cet équipement de pointe seront à la source du formidable essor de la physique des ions lourds française.

In 1966, a cyclotron designed for heavy ion acceleration began to work at the Orsay "Institut de physique nucléaire". Four years later, a linear accelerator, acting as ion injector for this cyclotron, is built. This technological break through leads to the constitution of Alice, which becomes the first machine in the world able to accelerate ions as heavy as krypton. The discoveries performed with this original device will be at the origin of the heavy ion boom in France.

AUTEUR

RENÉ BIMBOT

René Bimbot est agrégé de physique, docteur ès sciences, directeur de recherche émérite à l'IPN et au CNRS.