

L'élixir de courte vie (le glas des déchets longs)

Pas plus que les autres, ce numéro de *ScintillationS* n'est à jeter à la poubelle. Pourtant il est plein de déchets. Ceux qu'évoque ce numéro sont les cendres de ces chaudières à uranium plus connues sous le nom de centrales nucléaires et d'où proviennent les trois quarts de notre énergie électrique. Ces "cendres" sont formées de différents noyaux dont la plupart sont hautement radioactifs et beaucoup le restent extrêmement longtemps, parfois plus d'un million d'années. On les appelle les *déchets à vie longue*.

Ces déchets extrêmement dangereux et polluants sont actuellement confinés dans des conteneurs imperméables à la radioactivité que l'on stocke dans des conditions de sécurité maximale (on met les fûts sous clé, NDLR). Question immédiate : quelle sera l'étanchéité dans un million d'années ? Ou même dans 10 000 voire 1 000 ans ? On a beau choisir les sites géologiques de stockage pour leur particulière stabilité, on ne peut affirmer que cette stabilité va perdurer indéfiniment.

Le rêve serait donc d'avoir des déchets non radioactifs, ou radioactifs très peu de temps.

Ce rêve va peut-être devenir réalité. La Nature est bonne fille. Il suffit d'ajouter un neutron au déchet



Photo aérienne du centre EURATOM de Geel, en Belgique où la DSM participe à des mesures de sections efficaces de capture de neutrons par des noyaux, en vue d'étudier la transmutation des déchets nucléaires à vie longue. On distingue les « lignes de temps de vol » où l'on mesure la vitesse, donc l'énergie des neutrons

appelé technétium 99 qui vit en moyenne 200 000 ans, pour le *transmuter* en un autre noyau, le technétium 100 dont la durée de vie n'est plus que de **seize secondes**. Intéressant ! D'autant que ce brave technétium 100 se transforme spontanément par radioactivité bêta en un noyau de ruthénium 100 non radioactif. Youpi, on a gagné !

Pas encore. Sur le papier, c'est simple. Hélas...

Un noyau, c'est archiminuscule. Son volume est en gros (si l'on peut dire) un million de milliards de fois plus petit que celui d'un atome. Autant dire qu'il faut bien viser avec son pistolet à neutrons pour toucher un noyau de technétium 99. Ou alors il faut le submerger sous un Niagara de neutrons. En outre, une toute petite cendre de technétium 99 contient des milliards et des milliards de noyaux dont chacun est en moyenne à une distance du voisin supérieure à dix mille fois sa taille (comme un crâne à l'Orme et l'autre à Saclay). Il vaut mieux toucher le plus possible de noyaux si l'on veut que la cendre à vie très longue devienne une cendre à vie très courte. Et puis, ces neutrons, il faut les

produire. Et en très grand nombre. Et qu'ils aient la bonne énergie car leur probabilité d'être capturés en dépend énormément. Et qu'ils aillent dans la bonne direction. Or, comme son nom l'indique, un neutron, c'est neutre. On ne peut pas le dévier dans un champ magnétique, comme un proton ou un électron, particules électriquement chargées. C'est donc difficile de l'orienter dans une direction choisie.

Et pourtant, il faut arriver à réaliser tout cela. L'énergie la plus propre possible, c'est un sacré enjeu de société. Au point que cette recherche sur la *transmutation des déchets à vie longue* a été reconnue indispensable par le législateur. La loi du 30 décembre 1991 donne mission aux chercheurs nucléaires de la mener à bien.

Les chercheurs, et en particulier, ceux du DAPNIA, ne manquent pas d'idées dans ce domaine et souhaitent les concrétiser dans des projets réalistes. Ils attendent avec impatience des décisions dans ce sens ; souhaitons que leur enthousiasme ne soit pas déçu !

Le sujet a été abordé dans *Les Défis du CEA* n° 66, d'avril 98 dans un gros dossier de 9 pages : « Systèmes hybrides, le temps de l'exploitation », qu'on vous incite vivement à consulter. Entre autres informations, on peut lire, page 9, cette petite phrase sibylline : « *Les chercheurs du CEA et d'ailleurs réfléchissent ensemble à un futur "démonstrateur" etc.* ».

Ces « chercheurs du CEA », *ScintillationS* en a déniché : beaucoup d'entre eux œuvrent au DAPNIA. Plusieurs équipes internationales attaquent le problème par tous les bouts. Au Centre Commun de Recherche de l'Union Européenne « IRMM » à Geel, en Belgique (*photo*), on mesure systématiquement les probabilités de capture d'un neutron par toute une série de noyaux, dont notre vieille connaissance le technétium 99. Jusqu'à son trépas, Saturne était entre autres l'un des hauts lieux de l'étude systématique du processus de spallation (*ScintillationS* n° 22), qui permet de produire, à partir de matière bombardée par des protons, des neutrons aux vertus transmutatrices. Maintes équipes étudient différentes « filières », systèmes complets de transmutation tels que des systèmes « hybrides » qui vont de l'accélérateur à protons au réacteur nucléaire, creuset de l'alchimie transmutatoire, en passant par la « cible de spallation » (d'abord la fine, puis l'épaisse, NDLR) productrice des neutrons salvateurs. Les projets fleurissent : projet « INCA », projet Rubbia (Prix Nobel) etc.

Vous avez dit « accélérateur à protons » ? Mais c'est qu'il faut un Niagara de protons pour produire le Niagara de neutrons nécessaires. Justement, il existe des projets d'accélérateurs de protons à « très haute intensité ». Fort de ses spécialistes des accélérateurs du SEA renforcés par ceux de feu Saturne, le DAPNIA s'est impliqué dans l'injecteur d'un tel futur accélérateur. Ce projet, c'est l'Injecteur de Protons de Haute Intensité, IPHI pour les intimes, que détaille l'article de Claire Antoine (SEA) : « *Les protons sont de retour* », page 4.

Vous avez dit « probabilité de capture » ? D'une façon générale, la transmutation est le résultat d'une chaîne de réactions nucléaires : captures, fissions, etc., qui doivent toutes avoir une probabilité « raisonnable » de se produire, et ne pas fabriquer des déchets à vie encore plus longue. Sinon, on n'y arrivera jamais. Eh bien justement, un récent résultat incite à l'optimisme, et c'est le sujet de l'article de Michel Cribier (SPP) et Gabriele Fioni (SPhN) sur l'américium 241, page 2.

Branchez-vous sans délai et bonne lecture.

Joël Martin (*ScintillationS* et SPhN)

Transmutation de l'Américium 241 par des neutrons thermiques

(Les mots en rouge sont expliqués dans un glossaire en fin d'article)

Si un sujet de physique était censé recevoir un prix pour le grand intérêt qu'il suscite auprès des scientifiques et du grand public de par ses implications socio-politiques, comparées à la modeste relative des moyens que l'on y consacre, la transmutation des déchets nucléaires à vie longue aurait de bonnes chances d'arriver en tête.

Le problème

Dans le cadre des activités menées au sein du scénario INCA (INCInération par Accélérateur), des équipes du SIG, du SPhN, du SPP, du DCC/DPE, du Laboratoire Pierre Süe et de l'Institut Laue-Langevin (ILL) de Grenoble, se sont associées pour tenter d'enfin résoudre un problème majeur dans la chaîne de réactions nucléaires menant à la transmutation, induite par des neutrons thermiques de l'un des déchets nucléaires les plus toxiques l'américium 241 (^{241}Am), un noyau qui contient 95 protons et 146 neutrons.

En France, les éléments de combustible une fois déchargés d'un réacteur nucléaire, sont stockés dans des piscines de refroidissement. Après quelques années, ils sont acheminés vers l'usine de retraitement de La Hague, où sont extraits les isotopes de l'uranium et du plutonium afin de les réutiliser dans le combustible MOX (Mélanges d'Oxydes) que les réacteurs conventionnels modifiés peuvent employer. Tous les autres isotopes présents, produits de fission et actinides mineurs, constituent les déchets nucléaires et sont coulés dans une matrice de verre pour être entreposés.

Parmi les actinides mineurs, l'Am-241, dont la demi-vie est de 432 ans, est celui qui contribue le plus à la radiotoxicité à long terme des déchets nucléaires et sa transmutation dans des isotopes à demi-vie plus courte est prioritaire.

La nature elle-même nous indique la voie : un actinide après une ou plusieurs captures de neutrons a une probabilité accrue de fissionner, c'est-à-dire de se casser en deux noyaux plus légers, appelés fragments de fission. Or, les fragments de fission ont généralement des demi-vies assez courtes et des radiotoxicités à long terme inférieures à l'actinide qui les a créés.

La transmutation, par capture (voir l'Édito de Joël Martin) ou par fission, peut se faire aussi bien avec des neutrons thermiques qu'avec des neutrons rapides et des systèmes basés sur ces deux options sont à l'étude. La controverse qui a opposé dans le passé les partisans des réacteurs à neutrons thermiques et eau pressurisée (REP) à ceux des réacteurs à neutrons rapides (Super-Phénix) est ainsi proposée en version moderne !



Mise en irradiation de l'Américium 241 par une équipe du Département Réacteur de l'ILL. Trois séries d'irradiation ont été effectuées dans cette position

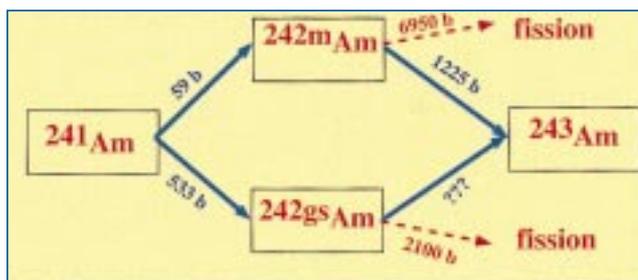
En effet, chaque système a ses propres avantages : les systèmes à neutrons thermiques bénéficient de sections efficaces (en gros, la probabilité, voir le glossaire n° 26, p. 4) plus élevées, ce qui signifie des systèmes avec une masse réduite et une grande vitesse de transmutation, alors que les systèmes à neutrons rapides offrent une plus grande réserve de neutrons donc une efficacité de transmutation accrue.

Thermique, rapide, ou encore rapide avec des zones thermiques ? La réponse sera donnée par les résultats des études en cours partout dans le monde ; il est néanmoins certain qu'il est difficile de trouver une solution unique pour l'ensemble des isotopes, car chaque noyau a ses spécificités et ses préférences... Quant à l'Am-241, il était jus-

qu'alors impossible de savoir si sa transmutation était possible avec des neutrons thermiques : dans sa chaîne de transmutation, la section efficace de capture d'un neutron par l'état fondamental de l'Américium 242 ($^{242}\text{gsAm}$) présente des désaccords d'un facteur 20 selon les bases de données nucléaires les plus utilisées : la base américaine ENDF-B/VI donne une valeur de 252 barns, tandis que son homologue européenne JEF 2.2 cite 5511 barns. Or, la capture d'un neutron par l'Am-242gs produit un autre isotope de l'américium, l'Am-243 (95 protons et 148 neutrons) dont la demi-vie (7370 ans) est presque 20 fois celle de l'Am-241. Cela ne va pas précisément dans le sens d'une réduction de la durée de vie des déchets ! Autre tuile : cet 243Am, est difficile à casser (on dit qu'il est non-fissile). On ne peut s'en débarrasser qu'au prix d'une étape supplémentaire dans la chaîne de transmutation : il faut qu'il capture un neutron pour se transformer en un noyau fissile. Cette contrainte entraîne que la filière n'est praticable que dans le cas où la probabilité de production de l'Am-243 est faible.

Voilà pourquoi il est crucial de mesurer la section efficace du principal phénomène qui produit l'américium 243, dans un haut flux de neutrons : la capture d'un neutron par l'américium 242gs. Si cette section efficace est de plusieurs milliers de barns, la filière est impraticable, car elle exige un apport de neutrons extérieurs trop important. Si elle est de quelques centaines de barns, le coup est jouable. Soulignons néanmoins que cette différence, cruciale pour un système d'incinération de déchets qui ne peut pas se permettre de gaspiller ses précieux neutrons, n'a quasiment aucun effet dans un réacteur conventionnel, où l'Am-242gs reste en concentration très faible en raison du bas flux neutronique et de l'absence de l'Am-241 dans le combustible de départ.

La différence dans les bases de données provient d'évaluations théoriques discordantes, qui ne peuvent s'appuyer sur des résultats expérimentaux fiables : la très courte demi-vie du $^{242}\text{gsAm}$, 16.02 heures, rend impossible le recours à des méthodes de mesures classiques.



Chaîne de transmutation de l'américium 241. Les points d'interrogations indiquent que la section efficace de capture d'un neutron par l'Am-242gs n'était pas connue jusqu'à la mesure présentée ici.

Or, on a pu récemment mettre en œuvre une solution à l'Institut Laue-Langevin de Grenoble, qui dispose du réacteur ayant le plus haut flux de neutrons thermiques au monde. À partir d'une cible d'Am-241, le haut flux permet de former des quantités d'Am-241 suffisantes pour influencer fortement la chaîne de transmutation. De plus, la parfaite **thermalisation** des neutrons à l'ILL nous dispense de corrections qui auraient rendu la mesure très imprécise.

La mesure

Le début de la chaîne de transmutation est montré sur le schéma ci-dessus, où l'on remarque bien que la section efficace de capture de neutrons par l'Am-242gs conditionne la quantité d'Am-243 formé au cours des irradiations.

Pendant l'irradiation, l'Am-241 se transmute, par des captures successives de neutrons et des décroissances radioactives, en d'autres actinides qui peuvent être fissiles.

Notre objectif était d'observer l'évolution d'un ensemble de 13 échantillons, contenant chacun 30 millionnièmes de grammes d'Am-241, irradiés dans deux flux neutroniques d'intensité différente ($5 \cdot 10^{14}$ et $3 \cdot 10^{13}$ neutrons par secondes et par cm^2) et pendant des temps compris entre 30 minutes et 24 jours. La **composition isotopique**, c'est-à-dire la quantité et la proportion des différents isotopes d'américium, de curium, de plutonium et des produits de fissions, apparaissant dans chaque échantillon dépend beaucoup de la valeur de la section efficace de capture de l'Am-242gs, mais aussi d'autres sections efficaces. Suivre l'évolution de la composition isotopique est donc une façon de recueillir des données sur les différentes étapes de la transmutation de l'Am-241 dans un flux de neutrons thermiques de haute intensité.

Malheureusement, la détermination de la composition isotopique n'est pas chose facile. Les échantillons après irradiation ont une radioactivité considérable, qui rend impossible à la fois leur manipulation et la

mesure directe par **spectroscopie gamma**.

Une astuce a été de comparer le spectre γ d'une certaine masse de mélange après une irradiation très brève avec celui d'un échantillon identique irradié 24 heures, et qu'on laisse « refroidir » (on laisse décroître sa radioactivité) pendant 8 mois. Huit mois, c'est

négligeable devant les 432 ans de demie vie de l'Am-241 qui n'a pas assez de temps pour décroître notablement, et grande devant celle de 16 heures de l'Am-242gs qui a tout le temps de disparaître. La comparaison précise des spectres γ des deux échantillons permet de distinguer les rôles respectifs de l'Am-241 et de l'Am-242gs dans la production des autres isotopes et d'accéder aux sections efficaces de capture de neutrons par l'Am-241, un autre paramètre critique et incertain de la chaîne de transmutation.

La plupart des analyses ont été menées à partir de diverses mesures en collaboration avec le Service des Physique et Chimie des Procédés (DCC) de Saclay. On a ainsi obtenu la composition isotopique des noyaux d'américium, de curium, de plutonium et des produits de fissions des échantillons. La sensibilité de cette méthode est de quelques dizaines de nanogrammes (milliardièmes de grammes), avec des précisions comprises entre 0,5% et quelques %, valeurs de très haute qualité.

Le dépouillement des données a été un véritable suspense : allaient-elles confirmer la valeur haute (filrière impossible) ou la valeur basse (filrière réalisable) ?

On ne vous fait pas languir davantage. La section efficace de capture de neutrons par l'Am-242gs a été trouvée égale à (280 ± 50) barns. C'est la valeur basse.

La transmutation de l'Am-241 par un haut flux de neutrons thermiques est théoriquement possible.

Le futur

Le futur se dessine sous la forme d'une belle et toute nouvelle installation consacrée à ces études ! Elle s'appellera Mini-INCA et permettra de déterminer par l'expérience les conditions idéales de transmutation des isotopes qui contribuent le plus à la radiotoxicité des déchets nucléaires. L'installation d'un nouveau canal est à l'étude à l'ILL, pour arriver à moins de 5 centimètres de l'élément de combustible, où le flux s'élève à plus de

$2 \cdot 10^{15}$ n/s/cm² ! On pourra moduler la forme du spectre neutronique en s'éloignant de l'élément de combustible et ainsi déterminer le flux idéal pour la transmutation de chaque isotope. Cette installation sera le complément idéal du réacteur Phénix, où des études de transmutation seront conduites avec des neutrons rapides.

Les déchets à vie longue n'ont plus qu'à numéroter leurs abattis ...

*Michel Cribier (SPP)
et Gabriele Fioni (SPhN)*

Glossaire



Actinides mineurs : éléments plus « lourds » que l'élément actinium, comme ²⁴¹Am, ²⁴³Am, ²⁴⁴Cm (curium 244) et ²³⁷Np (neptunium 237)

Américium 242gs (^{242gs}Am) : isotope de l'américium à 95 protons et 147 neutrons, dans son état fondamental (en anglais : « ground state », d'où « gs »).

Demi-vie : temps au bout duquel la moitié des noyaux d'un échantillon initial se sont désintégrés, ce qui diminue de moitié sa radioactivité.

Neutrons rapides : neutrons dont l'énergie cinétique (énergie due à la vitesse) est de plusieurs centaines de milliers d'électrons-volt.

Neutrons thermiques : neutrons dont l'énergie cinétique de 0,025 électron-volt correspond à une vitesse d'environ 2 km par seconde, comparable à celle d'une molécule dans un gaz à température ordinaire.

Spectroscopie gamma (γ) : technique basée sur le principe suivant : un noyau radioactif possède toute une panoplie de signatures. C'est, en quelque sorte, son code-barre. Parmi ces signatures, figurent l'ensemble des énergies des photons qu'il émet, et le nombre de photons émis dans chaque

tranche d'énergie. C'est ce qu'on appelle son spectre γ . La mesure du spectre global γ d'un mélange isotopique permet de reconnaître la contribution quantitative de chaque spectre individuel, et donc la proportion de chaque isotope.

Thermalisation : les neutrons produits

par fission nucléaire ont une énergie d'environ 2 MeV. Ce sont des neutrons rapides. La thermalisation consiste à les ralentir par chocs successifs dans la matière du modérateur, jusqu'à ce qu'ils atteignent l'énergie « thermique » ($E_n = 0.025$ eV), devenant ainsi, comme dirait M. de La Palice, des neutrons thermiques. Dans la

mesure rapportée par l'article de Cribier et Fioni, la thermalisation doit être la plus complète possible car les probabilités d'interaction des neutrons (sections efficaces) dépendent fortement de leur énergie. S'il subsiste des neutrons autres que thermiques, les calculs des corrections deviennent inextricables.

Joël Martin (SPhN)

Les protons sont de retour

Au mois de janvier 1998, le GECA (Groupe d'Étude et de Conception d'accélérateurs) issu de Saturne est venu renforcer les troupes du SEA, avec dans ses bagages un projet tout à fait dans les traditions du DAPNIA. Il s'agit d'IPHI (Injecteur de Protons Haute Intensité), premier étage d'un futur accélérateur de protons qui conjuguera **fort courant** et **fonctionnement en continu**, en vue de diverses applications, parmi lesquelles l'incinération de déchets nucléaires (voir page 1).

Avec des performances visées de 100 mA et 10 MeV, IPHI, tout en restant un accélérateur de faible énergie, fournira autant de puissance (faisceau transportant 1 mégawatt) que les accélérateurs de protons les plus puissants d'aujourd'hui : le LALN de Los Alamos ou le SIN du Paul Scherrer Institute, à Villigen près de Zürich.

Les applications possibles de ces faisceaux de protons

Outre la production de neutrons de spallation, première étape de la transmutation de déchets à vie longue, ces faisceaux de neutrons peuvent être utilisés pour fabriquer des radioisotopes spécifiques comme le tritium ou pour étudier la structure de certains matériaux.

On envisage d'autres applications : en physique nucléaire, un faisceau primaire de protons permettrait de produire un faisceau secondaire de noyaux exotiques ou radioactifs (voir n° 13). En accélérant des deutons au lieu de protons, on peut arriver à simuler l'ambiance « neutronique » de l'intérieur d'un Tokamak, dispositif d'étude de la fusion thermonucléaire. Les chercheurs de cette discipline sont vivement intéressés par ce type de faisceau pour tester les matériaux qui seront utilisés dans les projets ITER ou DEMO.

Pour toutes ces applications, un seul mot d'ordre : des protons somme toute « peu » énergétiques (environ 1 GeV), mais beaucoup à la fois ! Au point que les Japonais dans leur projet *Neutron Science Center* ont décidé de regrouper toutes ces recherches autour d'un seul et même accélérateur (encadré).

Les défis d'IPHI

Accélérer des protons est une technique maîtrisée depuis de nombreuses années, mais arriver à faire fonctionner de façon quasi-industrielle un accélérateur délivrant une telle intensité est une gageure qui demande de nouveaux développements dans tous les domaines touchant à cette machine : dynamique de faisceau et modélisation, stabilité et fiabilité des alimentations **hyperfréquence**, maîtrise des dissipations thermiques... Beaucoup de choix technologiques ont besoin d'être validés et/ou mesurés pour nous donner une idée des performances accessibles dans de tels accélérateurs.

Voilà le rôle d'IPHI, construit en collaboration avec l'IN2P3, et Thomson-AIRSYS pour la France, ainsi que pour certains points, le LALN de Los Alamos et l'INFN (l'homologue italien de l'IN2P3). D'ores et déjà plusieurs autres pays se lancent dans la course (Tableau ci-dessus).

IPHI sera composé d'une source (SILHI), d'un premier étage d'accélération le « RFQ » (pour Radiofrequency Quadrupole) qui amènera le faisceau à 5 MeV puis d'un second étage le « DTL » (photo page 6) (pour Drift Tube Linac) pour obtenir 10 MeV, avec les alimentations HF (onde accélératrice hyperfréquence) à forte puissance nécessaires et les outils de diagnostic adaptés.

La source SILHI a fonctionné à Saturne dès 1997, délivrant 100 mA à 100 keV. Elle vient de déménager à l'Orme des Merisiers (photo page 5) où elle poursuivra momentanément sa carrière. Les calculs et la conception définitive du RFQ sont en cours et l'on attend les premiers prototypes en 1999. On commence également cette année à étudier

la maquette d'une section du DTL. Nous verrons plus loin quelle pourrait être la suite de ce programme.

IPHI est un accélérateur linéaire, car c'est la seule configuration où l'on sait faire des structures à la fois accélératrices et **focalisatrices** (glossaire) adaptées à chaque gamme d'énergie. Or la **focalisation**, surtout

Projet	Pays	Applications : visées
ESS SNS	Europe États-Unis	Source de neutrons de spallation
TRISPAL APT	France États-Unis	Production de tritium
IFMIF	Europe + États-Unis + Japon	Tests matériaux (ITER)
Neutron Science Center	Japon	Source de neutrons de spallation, transmutation, production d'isotopes

basse énergie, est l'un des points délicats de ce type d'accélérateur : un faisceau mal focalisé « déborde » et s'il frappe des éléments de la structure, c'est toute la structure qui risque d'être radioactivée, ce qui est à proscrire pour des raisons évidentes de sécurité. On a calculé que pour rester dans les limites permises, la proportion de l'intensité perdue doit être inférieure à 2 millionièmes par mètre à basse énergie (celle d'IPHI), et à un demi-milliardième par mètre, à 1 GeV, énergie des protons aptes à produire les neutrons de spallation.

Or les programmes de calculs pour l'instant ne permettent pas de descendre en dessous d'une précision du dix-millième par mètre. Il faut donc non seulement développer ces programmes, mais encore les valider à l'aide d'un banc de test. C'est une première fonction pour IPHI.

L'autre point délicat, ce sont les alimentations des cavités haute fréquence. A priori, elles existent déjà, puisqu'elles ont été développées pour le CERN, mais leur capacité de fonctionner en continu, à forte puissance, avec



Source SILHI implantée à l'Orme des Merisiers

une bonne fiabilité n'a jamais été démontrée. Et lorsqu'on sait que ce poste peut compter jusqu'à 50% dans le budget d'une telle machine, cela vaut le coup essayer d'adapter les appareils existants à nos exigences... Il faut aussi améliorer tous les outils de transmission de cette puissance : fenêtres et coupleurs, pour minimiser l'ensemble des dissipations, et, comme toujours, obtenir une excellente fiabilité.

Les dissipations sont la hantise des spécialistes des accélérateurs. IPHI utilise une technologie classique (non supraconductrice), où les cavités sont en cuivre. Or, « effet Joule » oblige, avec tous ces mégawatts injectés ça chauffe énormément. Mais pour maintenir l'accord entre la fréquence de l'onde accélératrice et les dimensions des cavités amplificatrices, la température de la structure doit être contrôlée au degré près. Le casse-tête est de dessiner des structures où la répartition des champs est optimale pour l'accélération et/ou la focalisation, tout en permettant un bon refroidissement par les circuits d'eau. Evidemment les 2 fonctions ne sont pas toujours compatibles, et comme toujours on optimise en fonction des coûts.

Le futur d'IPHI

Un faisceau intense et continu entre 10 et 30 MeV est d'ores et déjà disponible pour produire des radio-isotopes, étudier des matériaux ou produire des neutrons de « basse énergie ». Mais IPHI pourrait constituer l'injecteur d'un accélérateur plus ambitieux (20-80 mA, 600 MeV-1 GeV) direc-

tement utilisable pour la transmutation de radio-isotopes comme l'étude le groupe INCA au CEA, (utilisation en mode continu), ou bien en mode pulsé pour l'étude des matériaux comme dans le projet européen de source de neutrons ESS.

Claire Z. Antoine, avec l'aide de Jean-Michel Lagniel et Pierre-Yves Beauvais (SEA)

Petit glossaire de l'accélération

(voir aussi les glossaires des n° 18,23, 32)

Focalisation : Les particules d'un faisceau d'accélérateur portent toutes une charge électrique identique (positive pour les protons, négative pour les électrons etc.) qui les fait se repousser. Cela a pour effet d'« élargir » le faisceau, de le faire diverger. Pour éviter qu'il ne se déborde de son tube, en général fort étroit, on force les particules à revenir vers l'axe du tube, comme une loupe fait converger les rayons solaires vers son foyer. Cette lentille focalise la lumière. On sait en faire autant avec les faisceaux de particules chargées à l'aide de lentilles électromagnétiques, puissants électroaimants très particuliers : ils ont quatre pôles. Ce sont les fameux quadripôles déjà évoqués dans *ScintillationS* (n° 18 et 32).

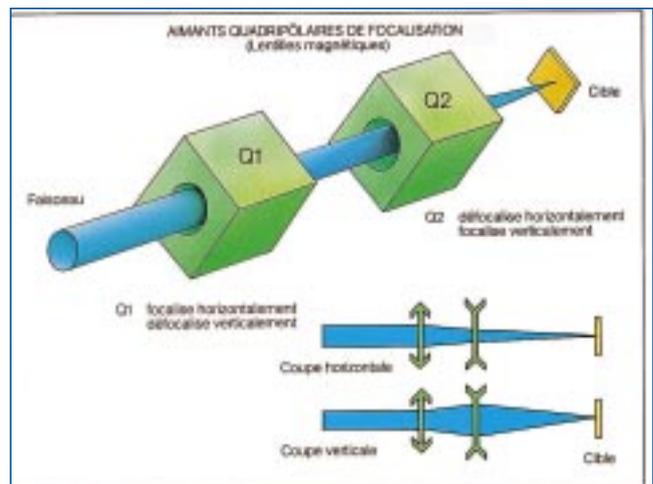
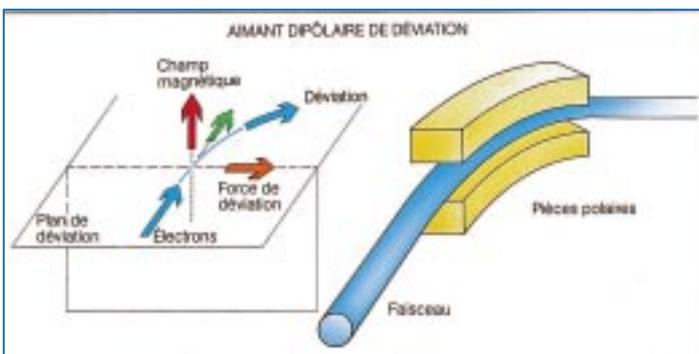
Fort courant : Appeler, comme dans l'article de Claire Antoine, « fort courant » un courant de 100 milliampères peut faire sourire les électriciens. Mais lorsqu'il s'agit du courant d'un faisceau de proton, le sourire fait place à un sifflement d'admiration. C'est qu'il faut que le faisceau débite à jet continu dans les six cent millions de milliards de protons par seconde pour atteindre cette intensité. Les plus performantes « usines à protons » du monde (Los Alamos et le SIN suisse, voir l'article) atteignent péniblement le centième de ce courant. Un accélérateur capable d'accélérer un tel Niagara de protons jusqu'à un milliard d'électrons-volt (1 GeV) ne se branche pas sur le 220. C'est une énorme machine qui pose d'énormes problèmes technologiques. Mais elle est indispen-

sable si l'on veut produire assez de neutrons pour transmuter une quantité significative de déchets.

Hyperfréquence (alimentation, onde, etc.) : Terme général, en abrégé HF, synonyme de fréquence très élevée. Les accélérateurs fonctionnent sur le principe suivant : des ondes électriques vibrant plusieurs milliards de fois par seconde poussent les particules comme les vagues poussent les surfeurs. Ces ondes sont produites par des alimentations hyperfréquences et amplifiées par des cavités accélératrices grâce au phénomène de résonance qui explique par exemple qu'une grotte de taille donnée amplifie telle note de musique bien plus que les autres. La dimension de la grotte est accordée à la fréquence de la note. Plus la note est aiguë (fréquence plus élevée), plus la cavité qui donne la résonance est petite. Voilà pourquoi, dans les accélérateurs, l'onde est de fréquence très élevée (hyperfréquence). Sinon, les cavités accélératrices pourraient dépasser la taille de Saint-Pierre de Rome... Une taille courante de cavité résonante est de 20 cm. Cela correspond à une fréquence de l'onde accélératrice de 1500 MHz (1,5 milliards de vibrations par seconde).

En résumé, le faisceau de particules est accéléré par l'onde (le champ) électrique hyperfréquence, courbé par le champ magnétique des dipôles (aimants à deux pôles) et focalisé par les quadripôles (voir schémas ci-dessous). Contrairement à ce qu'on lit parfois, ce n'est donc pas le champ magnétique, mais le champ électrique qui accélère les particules au sens où on l'entend en matière d'accélérateurs : accélération égale accroissement de la vitesse donc de l'énergie cinétique. Le champ magnétique sert à imposer une trajectoire donnée au faisceau, soit pour le maintenir dans le tube d'un accélérateur circulaire (synchrotron), soit pour le « transporter » jusqu'aux « cibles ». De ce fait, il communique une accélération aux particules, mais cette accélération-là ne sert qu'à leur faire changer de direction ; elle ne leur communique aucune énergie supplémentaire.

Joël Martin (SPhN)



Suite de l'article de Chris Llewellyn-Smith

L'abondance de l'actualité nous oblige à encore saucissonner cet article qui devient ainsi le feuilleton de l'année. La recherche fondamentale va-t-elle encore une fois être brillamment défendue par l'argumentation sans faille du talentueux directeur du CERN, vous le saurez dans deux mois (mais y a-t-il réellement suspense ?) avec la suite, et sans doute la fin de cette très belle saga. Que Chris Llewellyn-Smith veuille bien nous pardonner ce contretemps.

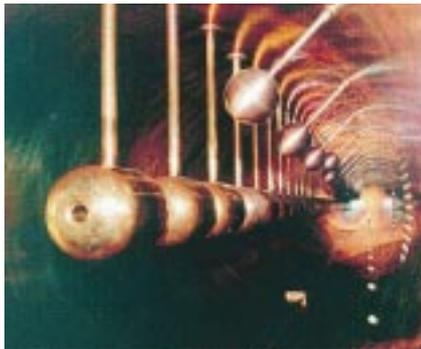
6. Quelle science financer ?

J'ai montré que des considérations économiques, autant que culturelles, amènent à la conclusion que le financement public devait être dirigé en premier lieu vers la recherche de base, plutôt qu'appliquée. Toutefois, si on fait appel de cette manière aux arguments économiques, on ne peut faire objection à leur utilisation dans les discussions relatives à la répartition des crédits entre les différentes branches de la science fondamentale. Cependant, la difficulté tient au fait que « la prévision comme l'innovation sont des processus hautement stochastiques, de sorte que la probabilité de prédire correctement une innovation, qui est le produit de deux faibles probabilités, est, en théorie, proche de zéro. »

Si Rutherford, qui a découvert le noyau, n'a pu prévoir l'énergie nucléaire, un comité gouvernemental aurait-il pu faire mieux ? Qui aurait pu prévoir les supraconducteurs chauds, les fullerènes (molécules en forme de ballon de foot de 60 atomes de carbone), ou le World Wide Web ? Un peu plus haut, j'ai laissé entendre que Faraday aurait pu prévoir les applications de l'électricité, mais en 1867, neuf ans après sa mort, des scientifiques britanniques, réunis en comité, déclaraient : « Bien que l'on ne puisse dire ce qu'il reste à inventer, nous pouvons dire qu'il ne semble pas y avoir de raison de croire que l'électricité sera utilisée comme un mode d'énergie pratique ». Dans la même veine, il est bien connu que Thomas Watson, créateur d'IBM, déclarait en 1947 qu'un seul ordinateur « pourrait résoudre tous les problèmes scientifiques important du monde, comportant des calculs scientifiques » et qu'il ne prévoyait d'autres usages pour les ordinateurs.

Cette impossibilité de prédire, qui, comme je l'ai soutenu, est l'une des raisons pour lesquelles il incombe aux gouvernements de financer la recherche de base en premier lieu, entraîne également qu'en pratique il est probablement impossible, et potentiellement dangereux,

d'essayer de répartir les crédits affectés à la science de base en fonction de l'utilité économique perçue. Les critères traditionnels d'excellence scientifique et de celle des personnels concernés, sont probablement aussi bons que d'autres et, selon moi, ce sont ces critères qui devraient continuer à être utilisés - après tout l'argent est plus abondant que la matière grise, même à notre époque où tout a un coût.



Vue intérieure du DTL 20 MeV de Saturne (voir page 4)

Le fait que les résultats de la recherche de base sont imprédictibles ne signifie pas que les incitations économiques à trouver des solutions à des problèmes appliqués particuliers sont sans intérêt. Au 19^{ème} siècle, des scientifiques étudiaient des méthodes permettant de fixer artificiellement l'azote, mais échouèrent jusqu'à ce que la première guerre mondiale prive l'Allemagne d'engrais ; une solution fut alors rapidement trouvée. La science, la technologie et l'argent des Etats-Unis répondirent à l'impératif politique de déposer un homme sur la lune avant 1970. Mais il importe de comprendre quand de telles incitations ont des chances d'être efficaces et quand elles n'en ont pas. Le Président Nixon lança une campagne contre le cancer, calquée explicitement sur le succès du programme spatial, mais elle échoua. La raison en est des plus claires. Les principes physiques en jeu pour l'envoi d'un homme sur la lune étaient bien compris avant le lancement du programme spatial, tandis que notre connais-

sance des lois biologiques qui régissent la croissance et la mutation des cellules est encore limitée.

Cela m'amène au financement de la recherche appliquée et de la technologie. J'ai soutenu que, en règle générale, les gouvernements devraient se tenir « à l'écart des marchés », et financer des domaines qui sont du ressort du « bien public » parce que leurs bénéfices sont à long terme, ou bien non commerciaux, comme par exemple les recherches sur l'environnement ou le contrôle de la circulation. Selon J. Baruch, dont un article récent [18] sert de base au prochain paragraphe, les recherches proches des marchés peuvent et doivent être laissées principalement à l'industrie - qui approuve.

De grandes sociétés comme 3M, IBM, Siemens, Ford, etc. veulent innover avec des technologies courantes, qui peuvent être quantifiées et prédites avec précision, et ne souhaitent pas être aidées par des universitaires, ce qui les contraindrait seulement à partager les profits. Pour leur part, les chercheurs universitaires ne s'intéressent pas à une telle collaboration. Les seules exceptions viennent des universitaires qui veulent innover, à l'aide des technologies disponibles, afin de développer de nouveaux instruments pour leurs recherches (les physiciens des particules entrent dans cette catégorie). En pareil cas, le bénéfice mutuel est considérable, comme l'est la synergie entre l'innovation technologique pour le profit et l'innovation technologique pour la recherche. De fait, selon Baruch « Les gens qui ont le plus à offrir [à l'industrie] sont les scientifiques voués à la recherche, et non les technologues ou ingénieurs universitaires, qui ne supportent pas d'être distraits de leurs recherches pour contribuer à résoudre des problèmes technologiques banals. »

Traduction d'Yves Sacquin

Suite et fin au prochain numéro.

Réf.[18] Why Should Companies-Large or Small-Work with the Universities? J.Baruch, Physics in Business 14, 4, 1997.

BRÈVES ... BRÈVES ... BRÈVES ... BRÈVES ...

Des déchets de Saturne bien retraités

Il s'agit des revues scientifiques (Nuclear Physics, Physical Review, Physical Review Letters etc.) de la défunte bibliothèque du Laboratoire National Saturne (LNS), qu'une sympathique collaboration franco-slovaque-ukrainienne a préservées de la décharge ou du pilon.

Une fois établie la liste des rebuts, euh, pardon, des revues, une seule bibliothèque française a répondu à nos offres de cession gratuite : celle du SPHT, ravie de pouvoir compléter ses collections. Merci à Marcel Gingold qui a assuré le transport et le reclassement à l'Orme. Mais il restait le plus gros.

Après quelques péripéties administratives, ces quelques trois mètres cubes (3 tonnes et demi) de concentré de physique ont trouvé asile dans les bibliothèques de l'Académie des Sciences de la République Slovaque et de l'Institut de Physique Technique KFTI de Kharkov, en Ukraine.

L'organisation a été au départ mise en place avec l'aide du professeur Michail Rekaló (spécialiste des déménagements à la serviabilité légendaire puisqu'il aida naguère à extraire les 60 lourdes chaises d'une salle de conférence en vue d'une expo pour le cinquantenaire du CEA, alors que les volontaires pour donner un coup de main ne se bousculaient guère...) qui nous a vite convaincus de la faisabilité du projet.

Que soient ici remerciés tous ceux qui nous aidèrent à surmonter les difficultés administratives et à rassembler les 180 piles de boîtes (NDLR) nécessaires. Une spéciale gratitude à Louis Bimbot et Jacques Ball qui prirent sur leur temps libre pour nous aider à classer et à emballer les revues.

Les professeurs S. Dubnicka en Slovaquie, et Alexej Rekaló en Ukraine se sont occupés des formalités d'arrivée et pris grand soin des précieuses revues.

Ce transfert a été possible grâce au professeur Dalhafi auquel a succédé mada-

me Hilda-Cerdeira à la direction Donation Program de l'UNESCO à l'ICTP de Trieste, et qui ont contribué au financement du transport.

Un merci particulier à Gilles Cohen-Tannoudji (DSM/DIR) qui a aplani bien des difficultés.

Cette opération n'a entraîné aucune charge ni financière ni en personnel pour le laboratoire. Le bénévolat et la bonne volonté (deux notions étymologiquement identiques) ont permis de mener à bien ce sauvetage de revues en péril.

*Egle Tomasi-Gustafsson
(ex-LNS et SPhN)*

Bases de données en libre service

Vous souhaitez consulter POVA, la base des Postes VAcants du CEA, ou effectuer des recherches d'informations sur des normes (base AFNOR), des entreprises françaises ou européennes (KOMPASS), des publications en sciences et techniques nucléaires (bases INSPEC, INIS, ENERGY, METADEX) ? Vous pourrez interroger toutes ces bases à partir des 3 PCs installés en libre service dans les bibliothèques du DAPNIA des bâtiments 141, 703, et 709. Bonne recherche à tous !...

Angèle Séné (DIR)

La Science en Fête

Sous la nouvelle appellation de Semaine de la Science, cette sympathique manifestation nationale a eu lieu cette année du 5 au 11 octobre. Saclay a ouvert ses portes le week-end. On en reparlera dans le prochain numéro.

Va-et-vient

Juin 1998 : Gaston Bruge (SPhN) part en retraite. On te la souhaite bonne, Gaston ! Tes pas te mèneront peut-être vers la verte Bruges (Qui a parlé de Gand, C'est un Flamand ! Mais c'est un Roumain qui présente ce beau Gaston...) *Gaston Bruge a été ces dernières années*

« commissaire », c'est à dire responsable de l'organisation de l'Exposition de Physique qui se tient tous les ans Porte de Versailles à Paris. Un autre membre du DAPNIA, Sotiris Loucatos (SPP), lui succède en 1998.

Juillet 1998 : Départ en retraite de Michel Gorisse (SAP), Michel Jacquet (SEI), Irène Morvan (SIG), et Monique Valée (SEI). Recrutement de Éric Pantin (SAP) et de Johan Relland (SIG). Michèle Poinot est mutée du SGPI au STCM et Michel Chalifour est muté du STCM au SED. Bienvenue et/ou bonne chance à toutes et à tous.

Août 1998 : Jean-Claude Faivre (SPhN), Gérard Molinelli (SAP) et Jean-Louis Peyrat (STCM) s'en vont vers d'autres horizons. On les leur souhaite radieux et ensoleillés. Gérard Ducos est muté du SEI au SIG. On lui souhaite bon épanouissement dans ses nouvelles fonctions.

Exposition, commissions et colloques

Les comptes rendus des troisièmes rencontres Physique et Interrogations fondamentales (PIF) organisées par la division « Champs et Particules » de la SFP (Société Française de Physique)

Prédiction et probabilités dans les sciences

ont paru en Juin 1998 aux éditions Frontières. Édités et judicieusement préfacés par Étienne Klein (DCC, bientôt DSM/DIR, ex SEA) et Yves Sacquin (SPP), ces comptes rendus offrent la prose talentueuse d'auteurs (leur Bitbol n'est pas un grand mou, NDLR) parmi lesquels quelques habitués dapnieux ou anciens dapnieux de ces rencontres : Bernard Bonin (IPSN, FAR), Gilles Cohen-Tannoudji (DSM/DIR, ex SPP) et Marc Lachièze-Rey (SAP).

Serveur de la SFP :
<http://sfp.in2p3.fr/SFP>



Regrets

Pierre Besson, du SED, vient de nous quitter lundi 12 octobre. Pierre, c'était le compétent modeste, le sérieux souriant, l'efficace tranquille. Ce talentueux de la détection reconnu et estimé savait se muer en communicateur aussi enthousiaste que bon enfant. ScintillationS en sait quelque chose, dont il fut l'un des fondateurs. Maryline, on a un chagrin immense.

A partir du 8 octobre, ne manquez pas de visiter l'exposition :

Figures du ciel,

dont le commissaire est l'ami Marc Lachière-Rey (SAp), installée pour trois mois à la Bibliothèque Nationale de France, site François Mitterrand, salles de recherche du rez-de-jardin.

Laissez un moment votre logiciel pour aller voir un joli ciel...

Pan ! sur le Becquerel

Une erreur et un oubli fâcheux dans « l'ours » (le petit carré jaune en bas à droite de la page 8) du n° 38 : Nathalie Colombel se retrouve « Colomben » et le petit nouveau scintillateur du SPP, Thierry Stolarczyk n'y figure pas. Excuses et bouteille(s) accompagnent la contrition du coupable, et ces erreurs sont versées dans la vaste « décharge » de bourdes qui n'ont rien d'insolentes.

Toujours dans le n° 38, deux coquilles ont échappé à l'œil qui se voudrait de lynx du relecteur habituel qui devait somnoler ce jour-là : page 4, dans l'encadré bleu, l'hydrogène s'est retrouvé affublé d'un \ddot{E} ; page 7, colonne 1 de l'article sur les neutrinos, il fallait lire que les 50.000 tonnes d'eau étaient enterrées dans une mine et non sans. Cette histoire de mine est piteuse.

Le Gluon d'Honneur

Il est attribué cet automne au mensuel (il ne s'agit pas d'un mensuel sinistre, NDLR) « Avantages » de septembre

1998, qui publie un article sur la « géobiologie », discipline de pointe, témoin cette révélation capitale (page 175) : « Un cactus posé sur le haut de l'écran ou un peigne en plastique a pour effet de neutraliser les rayons gammas* émis par l'ordinateur. » Détail piquant, le peigne doit avoir ses « dents tournées vers l'extérieur, sur le derrière de l'unité centrale. » Aïe !

L'article nous apprend aussi qu'on dort mieux la tête au nord et qu'une plante verte est l'antidote aux « activités vibratoires négatives » et autres « nocivités ambiantes » que collecte, comme personne ne l'ignore, une lampe à pied trop proche d'un canapé. Mais il n'est pas précisé s'il vaut mieux une lampe pleine de cavités ni s'il faut tendre son lit en vert...

* Petite précision : pour qu'un ordinateur émette des rayons gammas (photons d'énergie égale ou supérieure à quelques centaines de milliers d'électrons-volt), il faudrait qu'un ou plusieurs de ses composants soient sous une tension d'au moins quelques centaines de milliers de volts. Bonjour les étincelles et la note d'électricité ! Il est vrai que pour former l'image, l'écran de votre ordinateur est bombardé par des électrons de quelques 25 000 V. Cela entraîne l'émission de rayons X (qui sont également des photons, mais d'énergie au plus égale, dans ce cas, à 25 keV et encore, les plus énergiques sont les moins nombreux). Tout poste de télé en fait strictement autant, mais les rayons X sont arrêtés par une bonne épaisseur de verre. Ordinatez donc en paix, bonnes gens, avec ou sans cactus, ce n'est pas plus dangereux que de regarder « Interville », et, en prime, calculer, c'est sensé (NDLR).

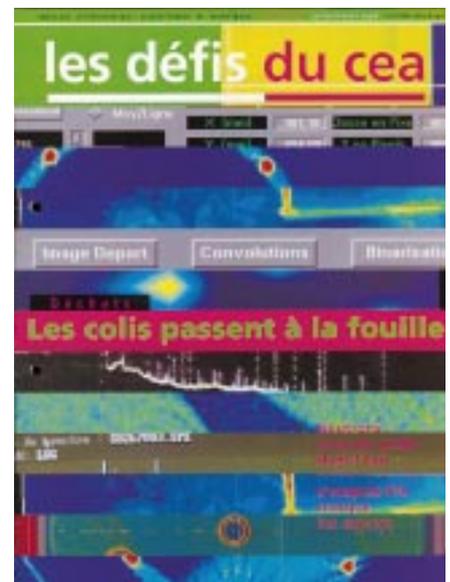
Clin d'œil

Très belle couverture des *Défis du CEA* (n° 69), avec cette jolie phrase digne des NDLR de *ScintillationS* :

« *Les colis passent à la fouille* ».

Les grands esprits se rencontrent : un beau mercredi de 1956, parut, dans certain journal satirique, qui n'exigera pas de copyright, le message suivant : « *La douanière passe bien des colis à la fouille* ».

Mais on ne parlait pas encore de carrières remplies de déchets ni de fûts pleins de curies...



CEA - DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION : Joël FELTESSE

COMITÉ ÉDITORIAL : Joël MARTIN (porte-parole),

Claire ANTOINE, Pierre BORGEAUD, Michel

BOURDINAUD, François BUGEON, Rémi CHI-

PAUX, Nathalie COLOMBEL, Thierry FOGLIZZO,

Elizabeth LOCCI, Marc PEYROT, Franck QUATRE-

HOMME, Yves SACQUIN, Angèle SÉNÉ, Thierry

STOLARCZYK, Christian VEYSSIÈRES

SECRÉTAIRE DE RÉDACTION : Maryline BESSON

MAQUETTE ET MISE EN PAGE : Christine MARTEAU

Dépôt légal octobre 1998

19!