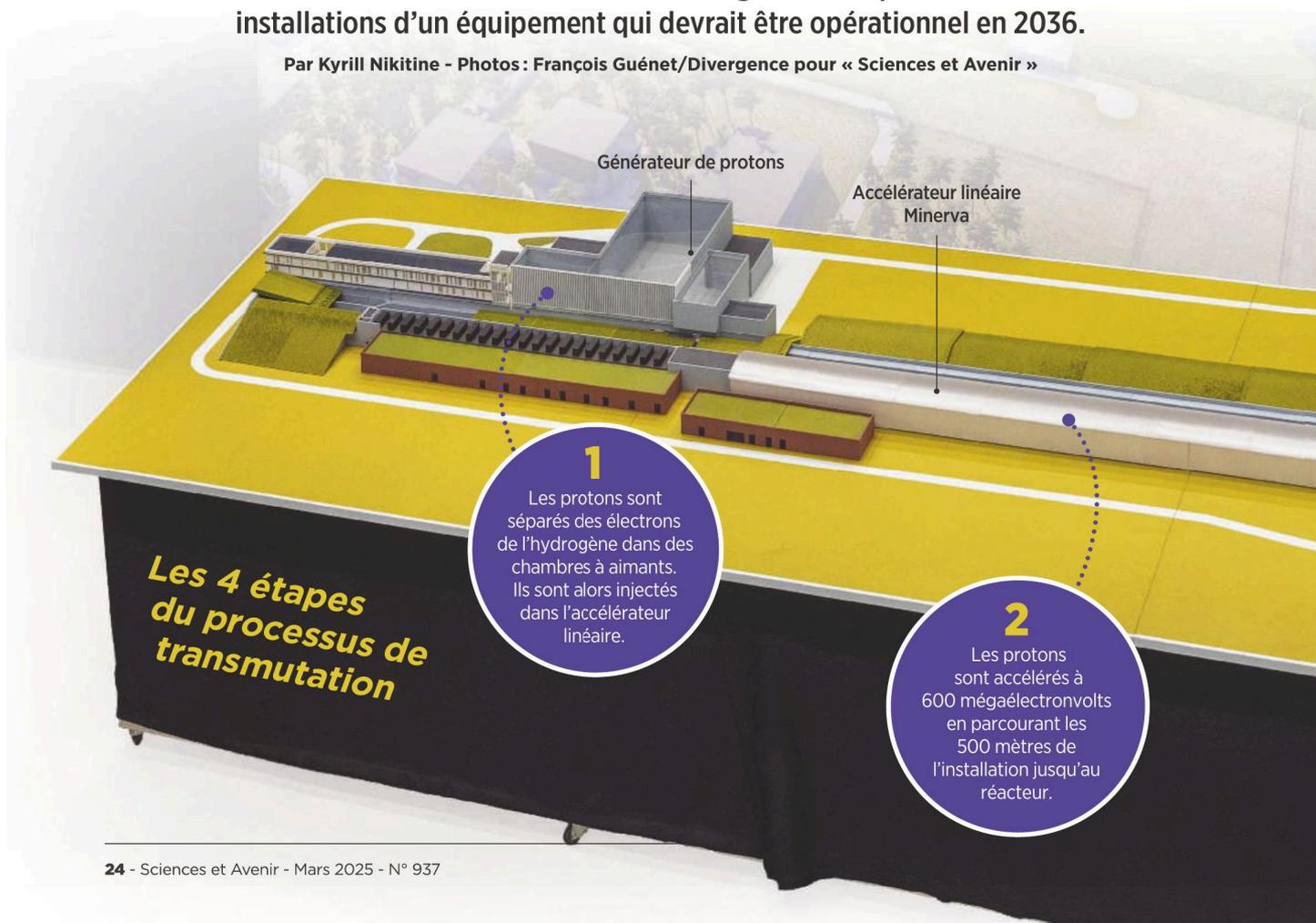


Transmutation

Réduire la durée de vie des déchets nucléaires

Les scientifiques du projet de recherche Myrrha développent un accélérateur de particules couplé à un réacteur afin de fissionner certains noyaux issus des combustibles usés pour réduire leur durée de radiotoxicité de 300 000 ans à 300 ans ! Visite guidée des premières installations d'un équipement qui devrait être opérationnel en 2036.

Par Kyrill Nikitine - Photos : François Guénet/Divergence pour « Sciences et Avenir »



C'est l'alchimie du XXI^e siècle : là où des savants du Moyen Âge rêvaient de transformer le plomb en or, des physiciens travaillent désormais à transformer les déchets nucléaires en des matériaux moins dange-

reux. Or, cette « transmutation » des temps modernes est devenue réalité à Mol, en Belgique. Comme on transforme un atome de plomb en un atome d'or en lui retirant trois protons, les scientifiques du projet de recherche nucléaire Myrrha (Multi-purpose hybrid research reactor for high-tech applications) modifient la structure d'atomes hautement radioactifs grâce à un bombardement de noyaux avec des particules à haute énergie. À leur tête, le physicien Hamid Aït Abderrahim, qui a mis au point le procédé pour fissionner certains noyaux issus des combustibles usés afin de réduire leur radiotoxicité.

Les déchets des centrales nucléaires sont issus du combustible usé retiré des réacteurs actuels au

bout de quatre ans et demi d'utilisation. Celui-ci est formé d'uranium 238 (93 %), d'uranium 235 (1 %), de plutonium (1 %) et de « déchets ultimes » (5 %) dont les plus radiotoxiques sont appelés « actinides mineurs ». Même s'ils ne constituent que 0,2 %, ils représentent près de 99 % de la radio-

toxicité. L'américium, le neptunium ou bien encore le curium possèdent une période active radiotoxique de près de 300 000 ans. « Notre système de transmutation permet de la réduire à seulement 300 ans ! » s'enthousiasme Hamid Aït Abderrahim.

Entamé en 1998, ce projet colossal, estimé alors à environ 2 milliards d'euros (investis principalement par le gouvernement belge) et réunissant désormais des chercheurs du monde entier, devrait être opérationnel en 2036, selon les prévisions actuelles. Le gigantesque site, en plein chantier, a déjà accueilli un premier prototype Guinevere surnommé affectueusement « Baby Myrrha », dont les premiers tests sur des déchets ont été effectués avec succès dès 2010.

20 000
kilomètre par
seconde

La vitesse des neutrons grâce au fluide caloporteur plomb-bismuth, contre 2 km par seconde avec de l'eau.

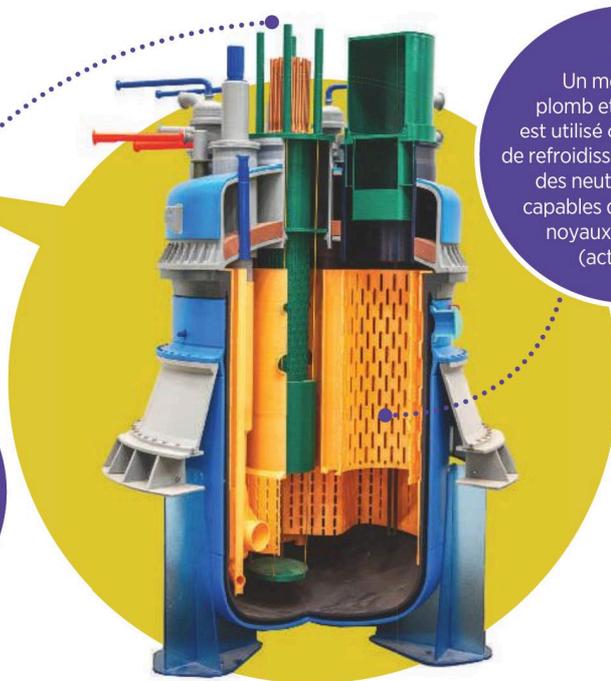
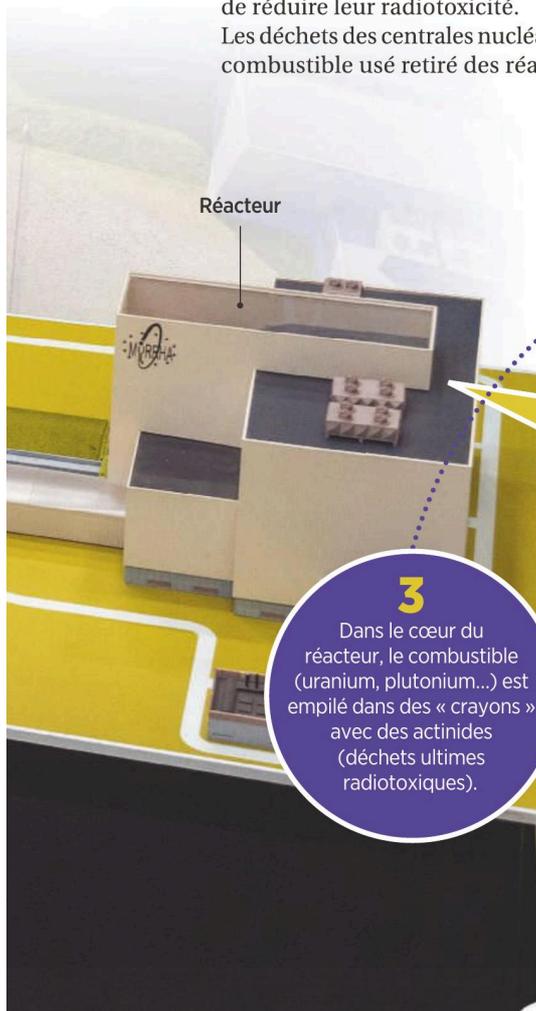
4

Un mélange de plomb et de bismuth est utilisé comme liquide de refroidissement, générant des neutrons rapides capables de détruire les noyaux plus lourds (actinides).

3

Dans le cœur du réacteur, le combustible (uranium, plutonium...) est empilé dans des « crayons » avec des actinides (déchets ultimes radiotoxiques).

Réacteur



FISSION « Cassure » d'un noyau très lourd en deux noyaux de taille moyenne. Cette cassure peut être exercée sur certains atomes que l'on dit fissiles.

PÉRIODE RADIOACTIVE OU RADIOTOXIQUE Appelée également « demi-vie ». C'est le temps au bout duquel la moitié des atomes radioactifs présents dans une quantité de matière se désintègrent.

TRANSMUTATION Dans le cadre du traitement des déchets radioactifs, c'est la transformation d'un noyau radioactif à vie longue en un autre noyau à vie beaucoup plus courte grâce à un bombardement de particules.

► C'est au milieu d'un gigantesque terrain vague où travaillent encore les pelleteuses qu'Hamid Aït Abderrahim présente la première partie du site : « Nous sommes en train de préparer l'installation de Minerva, un accélérateur de particules linéaire dont la construction et le test de son bon fonctionnement viennent de s'achever sur un autre site. »

Des cavités radiofréquence pour accélérer les particules

Un gaz d'hydrogène sera d'abord irradié par des micro-ondes de lumière à basse fréquence, ce qui aura pour effet de séparer les électrons des protons contenus dans le gaz. Les seconds seront injectés dans cet accélérateur. Pour accélérer les particules, celui-ci sera doté de cavités radiofréquence : des enceintes métalliques qui abritent un champ électromagnétique. Au fur et à mesure de leur trajet, les protons les franchiront alors qu'elles oscilleront entre charge positive et charge négative. Les conducteurs exerceront ainsi alternativement une répulsion et une attraction sur les particules, ces différents champs magnétiques provoquant ainsi leur accélération.



Boîte d'assemblage des « crayons », contenant les combustibles ainsi que les actinides mineurs, qui seront placés dans le cœur du réacteur.

« Notre accélérateur, dont l'énergie monte à 600 mégaelectronvolts au bout des 500 mètres de cavités, sera connecté ensuite à un réacteur situé dans une seconde structure », décrit le physicien Adrian Fabich, directeur

technique du projet Minerva. Là, seront empilées de petites pastilles de combustible (uranium, plutonium...) et d'actinides formant des « crayons ». Chacun contiendra environ 500 g de matière, constituant un total de 90 kg sur six assemblages. À terme, il sera possible d'insérer près de 45 % d'actinides dans un réacteur industriel prévu à cet effet.

Les neutrons vont rebondir comme dans un jeu de billard

Tandis que les réacteurs classiques fonctionnent avec de l'eau pressurisée comme liquide de refroidissement, celui de Myrrha, dont la température dépasse les 300 °C, fonctionne avec un mélange de plomb (45 %) et de bismuth (55 %). Dans une des installations du gigantesque laboratoire réservées aux tests, Hamid Aït Abderrahim décrit la consistance de ce liquide très particulier : « Ce mélange est essentiel pour la transmutation, car il permet à la fois de produire les neutrons primaires [qui viendront amorcer la fission de la matière radioactive] et de maintenir une réaction en chaîne à haute énergie dans le cœur du réacteur. De plus, ses propriétés chimiques permettent d'éviter les risques de corrosion à long terme, car, une fois intégré au réacteur, il sera maintenu en circuit fermé pendant quarante à cinquante ans. »

Ce changement de fluide permet de travailler avec ce que les physiciens appellent des « neutrons rapides ». Une solution à laquelle la France s'était intéressée avec le réacteur Phénix, définitivement arrêté en 2009. Joël Guidez, qui le dirigeait, explique les enjeux : « Lorsque l'on utilise de l'eau comme fluide caloporteur, ses atomes d'hydrogène, du fait de leur légèreté, absorbent

TECHNOLOGIE

L'Inde se met au thorium

Le gouvernement indien vient d'achever en 2024 son premier prototype de réacteur surgénérateur à neutrons rapides à Kokkilamedu, dans l'État du Tamil Nadu. Ce réacteur refroidi au sodium reposera sur l'utilisation de thorium 232, dont le minerai est beaucoup plus abondant que les gisements d'uranium et dont l'Inde possède un quart des réserves mondiales. Par transmutation, le thorium produira *in fine* de l'uranium 233, un combustible fissile. Il pourra ainsi générer plus de matière fissile qu'il n'en consomme. La production d'actinides mineurs pourrait être environ quatre fois plus faible que celle d'un réacteur à eau pressurisée. Avec un volume passant de plusieurs tonnes à quelques kilogrammes seulement.



Une cuve du réacteur à échelle 1/6 et des « échangeurs de chaleur » servent à tester la régulation de température du plomb-bismuth.

Un mélange plomb-bismuth (ci-dessus en barre) est utilisé comme liquide de refroidissement, ou fluide caloporteur, intégré en circuit fermé dans le réacteur (en haut).

les neutrons et leur font perdre de l'énergie en les ralentissant. » Dans ce cas, les neutrons sont dits lents. Leur vitesse est de l'ordre de 2 km/s, ce qui correspond à une énergie cinétique d'environ 0,025 électronvolt. « Le sodium ou le plomb-bismuth possèdent, quant à eux, des atomes beaucoup plus lourds, poursuit le physicien français. Les neutrons vont donc rebondir comme dans un jeu de billard et conserver leur

élan jusqu'aux atomes du combustible. » La vitesse des neutrons peut alors atteindre les 20 000 km/s, avec une énergie cinétique minimale de 1 mégaelectronvolt ! C'est ici qu'intervient la phase finale de la transmutation. Ces neutrons rapides sont capables de détruire des noyaux plus lourds que ceux de l'uranium comme ceux des actinides mineurs en les fissionnant. En effet, en fonction

de l'énergie des neutrons, ils s'agglomèrent au noyau ciblé et en modifient la structure. « Prenons le cas d'un noyau d'américium 241, explique Hamid Aït Abderrahim. Si le neutron est "lent", l'américium 241 se transforme en américium 242 après avoir capturé ce neutron, son isotope plus lourd. S'il reste suffisamment "en vie", il peut par la suite capturer un deuxième neutron et se transformer alors en américium 243. Par contre, si le neutron est "rapide", le noyau d'américium 241 est directement cassé en deux pour donner deux noyaux. On obtient ainsi les "produits de fission" qui, eux, sont beaucoup moins radiotoxiques. »

Faire fonctionner un tel réacteur n'est pas sans danger. Rappelons que l'uranium naturel ne contient que 0,7 % de matière fissile (de l'uranium 235) ▶

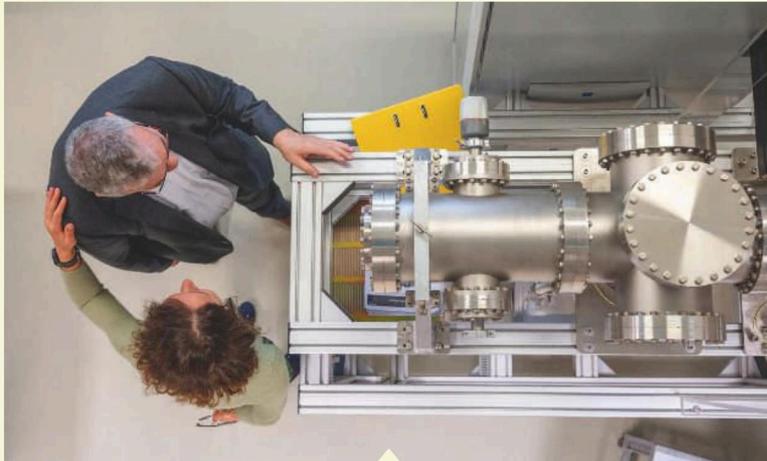


« Dans le cœur du réacteur, il n'y a pas assez de matière fissile pour maintenir la réaction en chaîne par elle-même »

Hamid Aït Abderrahim, directeur du projet Myrrha

APPLICATION

Des débouchés en médecine nucléaire



Des radio-isotopes thérapeutiques plus performants vont être développés grâce à l'accélérateur de particules du projet Myrrha (ici un circuit électromagnétique).

Le projet Myrrha est également un centre de recherche dédié à la médecine nucléaire, notamment pour le développement de nouveaux traitements contre le cancer. En utilisant le même accélérateur de particules, les protons sont projetés sur une petite cible de métal et créent un nuage de différents atomes. Ceux-ci sont ensuite

débarassés d'un certain nombre d'électrons à l'aide d'un laser, ce qui permet d'obtenir des radio-isotopes comme l'actinium 225 ou le terbium 161. Ce sont précisément ces radio-isotopes, émettant un rayonnement d'une très forte intensité, qui permettent de détruire les cellules cancéreuses. Pour les conduire

auprès de celles-ci, on fait appel à une molécule dite porteuse. Elles se fixent à des protéines spécifiques que ces cellules arborent à leur surface en plus grand nombre que les cellules saines. Ainsi, la majorité de ces dernières sont préservées et les effets secondaires pour les patients sont considérablement réduits.

► pour 99,3 % de matière non fissile (uranium 238). Les atomes d'uranium 238 sont dits fertiles car ils peuvent devenir fissiles : en absorbant un neutron « rapide », ils se transforment en plutonium 239. Il est donc ainsi possible de produire davantage de noyaux fissiles qu'il n'en est consommé, c'est la « surgénération ». Elle permet de brûler

le combustible jusqu'à 96 % ! « C'est là que tout se corse ! » avertit le physicien belge. Une telle puissance doit être maîtrisée, sinon on risque l'accident par emballement. Pour pallier ce risque, notre réacteur est dit sous-critique. » Sous-critique ? « Dans un réacteur classique dit critique, la réaction en chaîne est auto-entretenue, c'est-à-dire que

chaque neutron consommé pour faire une fission est remplacé par un autre, issu de la fission, explique Annick Billebaud, chercheuse au CNRS. Dans un système « sous-critique », on consomme plus de neutrons que l'on en produit, la réaction en chaîne s'arrête très vite. Donc pour fonctionner, un tel réacteur doit être alimenté en permanence en neutrons supplémentaires. Un cœur est calculé pour être critique ou sous-critique en jouant sur le type et la quantité de noyaux en présence dans les assemblages combustible-actinides et leur géométrie. » Et dans le cœur de Myrrha, « la matière fissile n'est pas suffisante pour maintenir la réaction en chaîne par elle-même : elle n'est pas auto-entretenue », confirme Hamid Aït Abderrahim. En effet, au bout de dix réactions en chaînes, soit un millionième de seconde, le processus s'arrête.

Myrrha permettra ainsi de brûler l'uranium et le plutonium présents dans les crayons, mais aussi les actinides mineurs, au bout de dix cycles de combustion. Or pour ces éléments, il n'existe à l'heure actuelle aucun moyen de les extraire des déchets nucléaires. Mélangés à du verre en fusion porté à 1100 °C, ils sont vitrifiés pour l'éternité.

15 machines nécessaires pour le parc nucléaire européen

Mais pour s'attaquer à tous les actinides générés par les pays européens qui veulent sortir du nucléaire, il faudra plus d'un Myrrha. Les équipes de Sylvain David, chercheur à l'Institut national de physique nucléaire et de physique des particules du CNRS, ont fait le calcul pour le seul parc nucléaire français : environ une tonne d'actinides est produite par nos réacteurs chaque année. « Il faudrait un peu moins de quarante ans pour brûler tous ces actinides, ce qui nécessiterait 15 machines industrielles de type Myrrha, d'une puissance totale de 6000 mégawatts », avertit Hamid Aït Abderrahim. Le prix de l'alternative à l'enfouissement. ■