

ASTER

plongée dans l'histoire de la terre

Révéler des parts inconnues de l'histoire terrestre, telle est la mission de l'immense Spectromètre de Masse par Accélérateur (SMA) qui se dresse dans le laboratoire du CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement) à Aix-en-Provence. Puissant outil de géochronologie, ce vaisseau technologique est devenu en quelques années le poumon instrumental d'un nouveau pan de la recherche géoscientifique. Permettant de repousser les frontières de la connaissance de notre système terrestre.

texte Christelle Gilabert photos Cyrille Choupas



« C'est bon, le faisceau est coupé, et la source est à l'arrêt », nous annonce Karim Keddadouche, alors que nous pénétrons dans le bâtiment. Niché dans une ancre de béton brut à l'apparence d'un bunker militaire, le Spectromètre de Masse par Accélérateur vient d'être mis en pause. Chemise noire et barbe grisonnante, Karim, ingénieur de recherche au CNRS et responsable d'ASTER, nous accueille entre deux séries d'analyses pour pouvoir nous laisser approcher la bête. Après avoir passé un sas vitré, nous nous retrouvons face à elle. L'engin s'étend sur plus d'une trentaine de mètres de long, formant un circuit de machines reliées les unes aux autres comme les wagons d'un train. La structure est telle qu'il est difficile de l'avoir en totalité dans son champ de vision. Dans la salle, un vrombissement continu avec un petit son aigu se fait entendre : « C'est le bruit du pompage, explique l'ingénieur, il faut que toute la ligne soit maintenue sous vide en permanence afin que les particules que l'on mesure ne rencontrent pas d'obstacles sur leur route. La moindre molécule d'air peut perturber leur course. »

CHASSE AUX NUCLÉIDES COSMOGÉNIQUES

Initiée dans les années 1980, la Spectrométrie de Masse par Accélérateur est une technique d'analyse de physique nucléaire qui permet de détecter dans l'environnement la présence de *nucléides cosmogéniques*. Un terme désignant des noyaux atomiques transmutés après avoir été bombardés par des rayons cosmiques, ces flux de particules hautement énergétiques provenant de l'espace. Ces nucléides cosmogéniques peuvent se retrouver dans l'atmosphère, dans les matières terrestres telles que les roches, les glaces, les sols, ou même dans les corps extraterrestres comme les météorites. Il en existe

un peu plus d'une vingtaine, dont le carbone 14, l'iode 129, l'aluminium 26, le béryllium 10 ou encore le chlore 36. Derrière leurs noms un peu barbares, la présence de ces nucléides transmet des informations cruciales. Ce sont des marqueurs temporels permettant de dater ou de quantifier des processus qui modèlent les paysages de la Terre. Lorsqu'une roche se retrouve exposée, elle est bombardée par les particules du rayonnement cosmique et commence à accumuler des nucléides cosmogéniques. Et le nombre de nucléides produits est proportionnel à la durée d'exposition d'un matériau. Un peu comme du bronzage. Les scientifiques peuvent ainsi détecter l'occurrence des événements terrestres ayant contribué à cette exposition, comme la fonte des glaciers, les tremblements de terre,

les glissements de terrain... Et ce, avec une précision assez fine, sur des périodes géologiques très courtes allant de l'ordre de la dizaine d'années aux millions d'années. « C'est fondamental pour comprendre les liens entre les événements. Les méthodes de détection-attribution d'un comportement s'en retrouvent grandement améliorées », souligne Vincent Jomelli, directeur de recherche au CNRS, spécialiste du comportement des glaciers. Mais l'analyse des nucléides cosmogéniques est un vrai défi, car ils n'existent qu'en quantité infime par rapport au reste des éléments présents dans l'environnement. L'écart est immense, de l'ordre de 10⁻⁹ à 10⁻¹⁴. Soit une particule pour 100 000 milliards ! « C'est comme vouloir mesurer une goutte de pastis dans le Vieux-Port de Marseille ! », illustre Lucilla Benedetti,



7 MILLIONS D'EUROS

4,5 millions pour la machine, et 2,2 millions pour le bâtiment.

La machine tombe en panne tous les deux ans environ ; lorsque nous y sommes allés, la machine venait de subir une panne de trois mois !

directrice de recherche au CNRS, spécialisée en paléosismologie, reprenant l'expression de son collègue Vincent Godard, co-responsable du Laboratoire National des Nucléides Cosmogénique (LN2C). « Donc pour pouvoir mesurer ces quantités infimes, on a besoin d'un appareil capable de les détecter et de les compter. » C'est précisément la fonction d'ASTER.

UN VOYAGE ATOMIQUE COMPLEXE

Avant de pénétrer dans les entrailles de la bête, chaque prélèvement de matière (roches, sédiments, végétaux...) doit passer par les laboratoires où il subit une longue série de traitements physiques et chimiques : broyage, extraction, purification, oxydation... afin d'aboutir à une fine poudre de quelques milligrammes. Ensuite, direction ASTER. La poudre est versée dans une cathode, une sorte de minuscule tube que Karim nous montre au creux de sa main et qu'il place ensuite dans l'un des deux carrousels d'ASTER. Ce sont deux gros barillettes, semblables à ceux d'un vieux pistolet, situés à l'entrée de la machine que l'on nomme la *source*. Chaque carrousel peut accueillir jusqu'à 200 échantillons qui sont ensuite analysés un par un. L'objectif de la machine est d'isoler les nucléides cosmogéniques que l'on recherche (par exemple le béryllium 10) et d'évaluer leur nombre par rapport à son élément stable (le béryllium 9).

Que se passe-t-il une fois les échantillons installés dans la machine ? La source convertit les atomes en ions pour les propulser sous forme d'un faisceau vers le circuit d'analyse. C'est parti pour le voyage ! Première étape, le faisceau d'ions arrive vers un aimant à 90° dont le champ magnétique dévie la course, comme un virage. Selon sa masse, chaque ion prend un chemin de courbure différent. La géométrie

de la machine est configurée de manière à ne laisser passer que la trajectoire empruntée par la masse de l'atome que l'on souhaite analyser. Par exemple, le béryllium 10. Pour ne pas perdre le béryllium 9 (l'élément avec lequel il est comparé) dont la masse diffère, celui-ci est maintenu dans la course grâce à l'influence d'un champ électrique lui donnant la même trajectoire. Tous les autres éléments non désirables sont écartés naturellement. C'est la séparation par spectrométrie de masse.

Seulement, parmi les particules restantes, se glissent également des éléments ayant naturellement la même masse que le nucléide d'intérêt. Ces éléments « parasites » sont appelés des *interférents*. C'est là que l'étape d'accélération intervient pour opérer une deuxième séparation. Destination : la colonne accélératrice. Une sorte de gigantesque citerne remplie de tubes accélératrices. Les particules sélectionnées sont injectées dans les tubes où elles subissent une première accélération produite par une charge électrique pouvant atteindre 5 millions de volts ! C'est l'énergie nécessaire pour leur faire traverser un *stripper*, un canal dit « éplucheur », qui contient un gaz contre lequel les molécules vont venir se fragmenter. Cette étape va produire une seconde accélération. En sortie d'accélérateur, les particules de même énergie (augmentée par la double accélération) et de même masse (comme le béryllium 10 et les parasites de masse identique) traversent ensuite une feuille de nitrure de silicium qui va leur faire perdre une quantité d'énergie différente selon la nature de l'élément. Cette différence de perte d'énergie est la clé de la séparation des nucléides vis-à-vis de leurs interférents. Finalement, seuls les ions de que l'on souhaite comptabiliser atteindront le bout de la ligne où se trouve un détecteur pour les compter un par un. Au passage, un aimant à 90° situé à la sortie de l'accélérateur aura permis de séparer le nucléide (Be10) de son isotope stable (Be9) selon leur masse. Le béryllium 9 est dévié, puis collecté dans une cage de Faraday à part. « Il faut compter environ une heure d'analyse par



échantillon, indique Karim, je suis un peu comme un pilote! Je dois diriger le faisceau à travers chaque processus pour assurer que la séparation et la mesure du nucléide recherché soit optimale.»

Chaque année le laboratoire LN2C réalise entre 4 000 et 6 000 analyses d'échantillons. Pour pouvoir répondre à ces innombrables demandes, l'instrument est en fonctionnement 24h sur 24 et 7 jours sur 7. «Lorsqu'ASTER est malade, c'est tout le labo qui est malade», plaisante Régis Braucher, chercheur au CNRS et co-responsable du laboratoire LN2C. Même lorsqu'ils ne sont pas au laboratoire, les membres de l'équipe restent connectés à l'instrument en permanence via une application. Karim, qui travaille aux côtés de l'instrument depuis 15 ans, sort son téléphone pour nous la montrer. «Je ne compte plus le nombre de conversations, surgissant les week-ends ou en pleine nuit, avec mes collègues Georges Aumaitre et Zaidi Fawzi ou encore il y a peu avec le boss fondateur du labo, le regretté professeur Didier Bourlès, afin de résoudre le moindre dysfonctionnement, raconte-t-il, on vit littéralement avec la machine, c'est une lourde responsabilité

qui pèse beaucoup sur notre quotidien.» Par ailleurs, l'appareil fait l'objet de perpétuels développements afin de garantir des résultats de qualité et rester à la pointe de la technologie. Actuellement, les techniciens travaillent à l'ajout d'un bout de ligne supplémentaire supposé améliorer la mesure de l'aluminium 26.

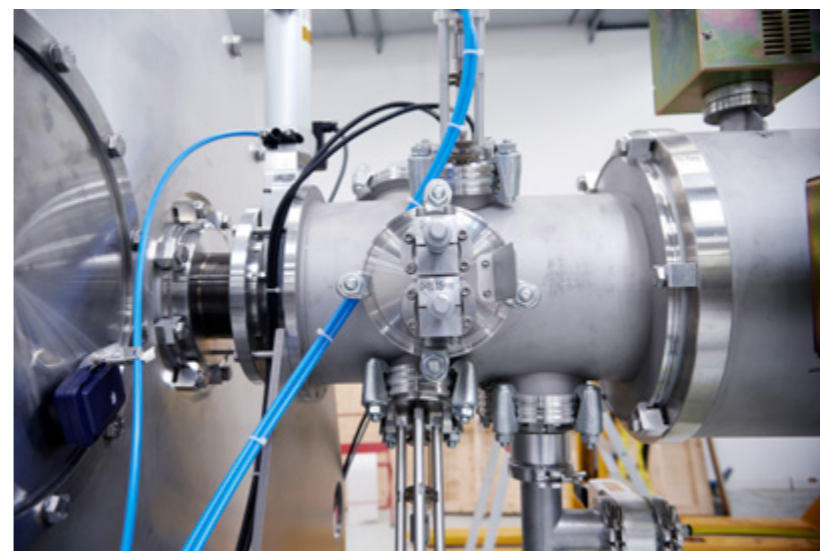
MACHINE À REMONTER LE TEMPS

Paléontologues, paléoclimatologues, paléoglacialogues, archéologues, paléoanthropologues... tous comptent sur l'aide d'ASTER pour décrypter l'évolution de la planète. «Les paysages de la Terre sont comme les pages d'un livre dont certaines ont été déchirées. Ils nous indiquent certains morceaux de l'histoire, et nous scientifiques, il faut que l'on retrouve l'histoire chronologique qui tisse les liens entre les pages existantes et les pages manquantes. L'intérêt d'ASTER, c'est qu'il nous permet de savoir où se situent dans le temps les pages que l'on a déjà», déclare Vincent Jomelli. Car la traque des nucléides cosmogéniques fournit une méthode de datation dite absolue. Là où les méthodes classiques ne fournissaient

Légende

qu'une estimation relative de la temporalité des événements, «plus récent que» ou «plus ancien que», sans pouvoir les situer précisément dans le temps. Les applications sont multiples!

En 2012, les mesures faites sur ASTER ont permis de déterminer l'âge de l'un des premiers hominidés sur Terre, Toumaï, à 7,3 millions d'années (voir aussi pour Toumaï les méthodes archéologiques de datation, p.44). Ou encore d'identifier avec précision deux périodes d'occupation humaine de la célèbre grotte de Chauvet. Une trouvaille qui a conduit à rectifier l'âge des peintures qui s'y trouvent, estimé à 10 000 ans trop tôt jusqu'alors. Cependant, ces explorations temporelles sont surtout dédiées à l'étude de l'environnement et des risques (naturels ou anthropiques). Irène Schimmelpfennig, chargée de recherche au CNRS, se penche par exemple sur la fluctuation des glaciers dans le passé: «En comparant avec ce qui se passe aujourd'hui, ces recherches nous aident à mieux discerner ce qui relève des variations naturelles et des forçages anthropiques dans l'influence de leurs comportements.» Des éclairages précieux pour affiner les modèles climatiques. De son côté, Lucilla Benedetti s'intéresse à l'histoire sismique des failles: «Nos investigations en Italie ont révélé que les séismes ne se reproduisent pas du tout à intervalles régulièrement, contrairement à ce qui était scientifiquement admis pendant longtemps.» Enfin, une autre application essentielle est le suivi des



Légende

nucléides produits par l'industrie nucléaire, afin d'évaluer les risques pour l'environnement et la société.

INSTRUMENT NATIONAL

Inauguré en 2006 au sein du LN2C, ASTER est unique en France. Il n'existe à peine une centaine dans le monde, dont une vingtaine en Europe. Il est ce que l'on appelle un Instrument National. Un bien commun d'exception mis à la disposition de la recherche publique. Sa présence constitue une aubaine pour la communauté scientifique française et un atout de taille sur la scène internationale. L'acquisition de l'engin a coûté près de 7 mil-

lions d'euros, un investissement colossal pour les chercheurs français qui ont gagné en autonomie et en réactivité: «Auparavant, je devais faire mes mesures aux États-Unis. Avec une cinquantaine d'échantillons par an à 400 \$ dollars l'échantillon, vous imaginez le budget. ASTER représente une économie énorme à l'échelle de la communauté», révèle Lucilla.

Surtout, son utilisation a permis d'ouvrir un nouveau chapitre scientifique au sein du CEREGE, en développant un champ d'exploration inédit dans l'étude du système Terre. Il y a un avant et un après ASTER. «Beaucoup de chercheurs et chercheuses sont venus ici pour cet outil et ne se verraient plus faire sans», témoigne Lucilla. «Pour moi, ASTER, c'est mon enfance de chercheuse en quelque sorte, ça a sculpté mon approche et mes intérêts scientifiques», reconnaît Irène. «Cette machine, c'est surtout l'œuvre de Didier Bourlès», répètent les équipes. Le nom du professeur, malheureusement emporté par la maladie en 2021, revient sur toutes les lèvres. Ce physicien hors pair, au look rock'n'roll, pionnier dans l'analyse des nucléides cosmogéniques, était reconnu dans le monde entier pour son expertise unique. C'est lui qui a piloté l'arrivée d'ASTER sur le site, puis dédié les 20 dernières années de sa vie au développement et aux applications de la machine.

Avec ses équipes, il a toujours favorisé un usage de cet Instrument National qui soit prioritairement dédié à la communauté française et aux projets de recherches faisant avancer la science. Une particularité qui le distingue de la plupart de ses homologues internationaux, et à laquelle les équipes du CEREGE sont profondément attachées. «Avec ce genre de machine, le temps est compté. Si l'on se mettait à faire des prestations de mesure en dehors des prérogatives de l'Instrument National, cela nous freinerait considérablement en termes de développement scientifique et de créativité», nous apprend Lucilla. «Il faut donc que l'on soit convaincu de la pertinence scientifique d'un projet pour collaborer.» Bref, avec ASTER, la Terre n'a pas fini de nous raconter des histoires!