

Les Savanturiers

18

DÉCEMBRE 2016

En mission avec les scientifiques du CEA



> Le principe de datation

> Sur la trace des premiers artistes

> Remonter le temps avec Artémis

p. 2-3



p. 4-5



p. 6-7



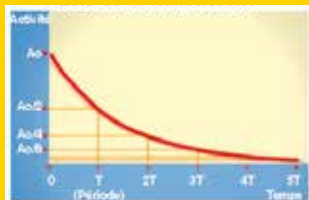
Carbone 14, maître du temps

Le carbone est un atome très répandu sur Terre. Parmi ses isotopes, les chercheurs traquent le ^{14}C , présent dans les composés organiques en très petite proportion, comme ceux trouvés dans la Grotte Chauvet ou dans des vestiges égyptiens. Pour déceler sa présence, ils utilisent des machines très sophistiquées et très sensibles : les spectromètres de masse par accélérateur.

Le principe de datation

Certains éléments radioactifs naturels sont de véritables chronomètres pour remonter le temps. En se basant sur la loi de décroissance radioactive, les chercheurs ont mis au point des méthodes de datation. Pour les échantillons de moins de 50 000 ans et qui contiennent du carbone, celle utilisée s'appuie sur la mesure des isotopes du carbone.

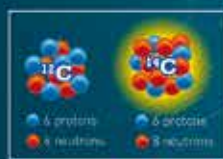
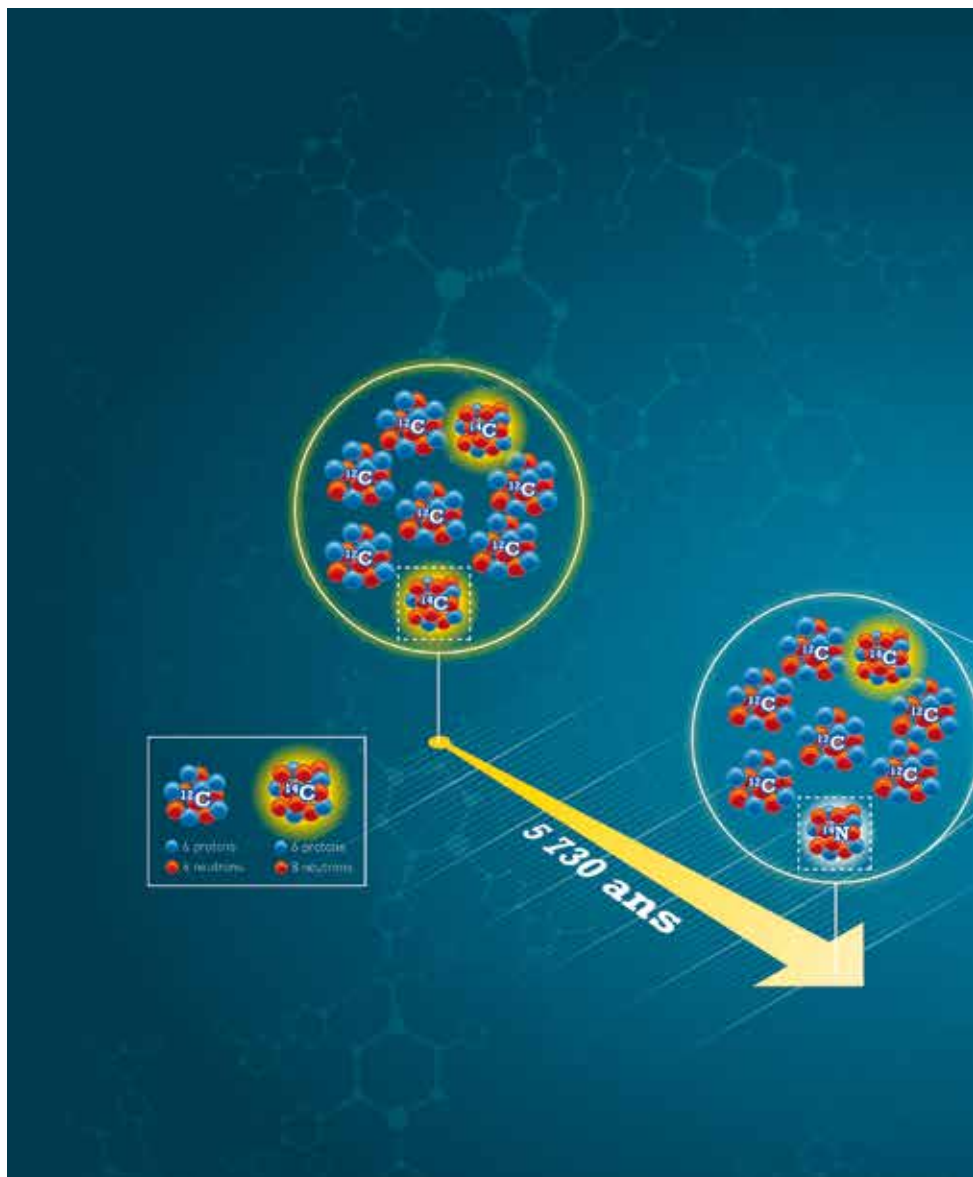
Décroissance radioactive



A cause d'un excès de protons, neutrons (ou des deux), certains noyaux sont instables ; ils sont radioactifs. Ils se transforment spontanément en d'autres noyaux, en

émettant des rayonnements ; on dit qu'ils se désintègrent, jusqu'à atteindre un état stable par étapes successives.

La désintégration radioactive d'un noyau est un phénomène aléatoire. Les lois du hasard font qu'au bout d'un temps T , appelé « période » ou « demi-vie », l'activité d'un échantillon a été divisée par 2. Au bout de 2 périodes, il reste un quart des noyaux radioactifs, au bout de 3 périodes, un huitième... après 10 périodes, il n'en reste qu'un millième. Cette période est connue pour tous les noyaux radioactifs, elle varie de quelques nano-secondes, plusieurs jours... à des centaines voire des milliards d'années.



Le carbone

Le carbone (symbole C) est l'élément chimique de numéro atomique 6 ; cela veut dire que son noyau contient 6 protons. Il possède 16 isotopes. Les plus abondants sont deux isotopes stables : le carbone 12, dont le noyau est composé de 6 protons et 6 neutrons et le carbone 13 (6 protons et 7 neutrons), dont la proportion est de 1 %. Un autre isotope connu est le carbone 14, radioactif (6 protons et 8 neutrons) ; il est formé dans la haute atmosphère, par action des rayonnements cosmiques sur les atomes d'azote (^{14}N).

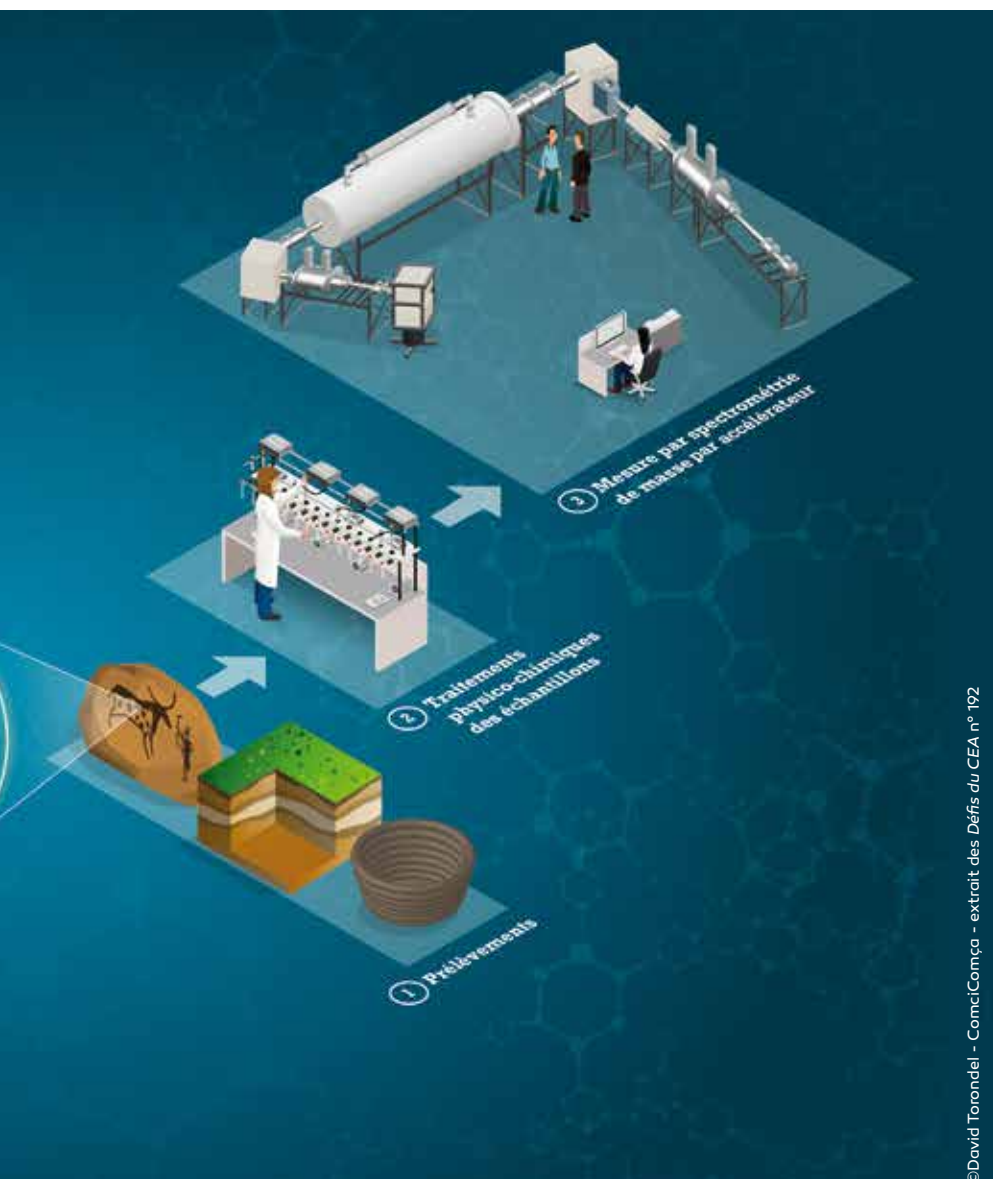
Le carbone est très répandu dans notre environnement. Sur Terre, la proportion est d'un atome de ^{14}C pour mille milliards de ^{12}C . Le ^{14}C s'oxyde au contact de l'oxygène pour former du dioxyde de carbone (CO_2) qui se répartit rapidement dans l'atmosphère, les océans, la végétation... Il est assimilé par les organismes vivants (par photosynthèse, alimentation, respiration).



Animation Datation
www.cea.fr/multimedia/Pages/animations/radioactivite/datation-carbone-14.aspx

Livret pédagogique n° 2
 « La radioactivité »
 + quiz

Willard F. Libby a reçu le prix Nobel de Physique en 1960 pour sa méthode d'utilisation du ^{14}C pour la datation.



© David Torondel - ComciComca - extrait des Défis du CEA n° 192



La datation au carbone 14

Lorsqu'un organisme meurt, il n'assimile plus de carbone. La quantité de ^{12}C et ^{13}C reste stable tandis que celle de ^{14}C diminue. Il se désintègre à un rythme régulier : au bout d'une période de 5 730 ans, la moitié des atomes de ^{14}C est devenue de l'azote 14.

Les chercheurs calculent « l'âge carbone 14 » de leur échantillon à partir des rapports $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ et $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ mesurés, puis en déduisent son âge vrai grâce aux courbes de calibration. Ils peuvent ainsi remonter sur une période de 300 à 50 000 ans. Au-delà, la quantité restante de ^{14}C est tellement faible qu'elle n'est plus mesurable.

Courbe de calibration

Deux postulats de la première loi de décroissance se sont rapidement révélés inexacts. Tout d'abord, la période du ^{14}C n'est pas de 5 568 ans, mais de 5 730 ans. Ensuite, la teneur initiale en ^{14}C de l'atmosphère (N_0) n'est pas constante au cours du temps, mais varie selon la nature de l'échantillon et l'époque à laquelle il a vécu.

L'exercice de calibration pour mesurer ce N_0 a commencé dès 1970. Les géochronologues ont construit une courbe de référence sur la base d'échantillons (des cernes de pins et de chênes, des coraux, des **spéléothèmes** et surtout des restes végétaux extraits de sédiments **varvés** lacustres) dont l'âge absolu était connu et sur lesquels ils ont mesuré le ^{14}C résiduel. Cette calibration continue d'être enrichie par l'accumulation constante de nouvelles données. Elle couvre les derniers 50 000 ans, c'est-à-dire toute la gamme de mesure du ^{14}C .



Prélèvement de sédiments lacustres.

VHLEXIQUETGHKGHMLJ

Varve : Dépôts sédimentaires composés de couches saisonnières alternativement riches et pauvres en matière organique et fines et grossières.

Spéléothèmes : Dépôts de carbonate de calcium précipité dans une grotte (stalactites et stalagmites).

Sur la trace des premiers artistes

Afin de garantir la validité de leurs résultats, les chercheurs effectuent eux-mêmes les prélèvements et suivent leurs échantillons à chaque étape de préparation et de mesure, jusqu'à leur comparaison avec les courbes de calibration.

Quels échantillons dater avec le ^{14}C ?

Tous les vestiges contenant du carbone d'origine organique et inorganique peuvent être datés. Cette méthode peut donc s'appliquer aux os, charbon de bois, bois, restes organiques, coquilles marines, graines, pollen, sédiments marins... ainsi qu'à des tissus, parchemins, poteries, certains mortiers et les inclusions de charbon dans l'acier.

Les champs d'application sont donc variés :

- **La géologie** : datation de sédiments et reconstitution de l'évolution de paysages, détermination de la fréquence d'évènements sismiques et volcaniques (en datant les restes végétaux consommés dans la coulée de lave).
- **L'archéologie et l'art** : estimation de l'âge d'objets ou de matériaux anciens pour retracer l'évolution de l'homme à travers le temps.
- **La climatologie** : datation des archives climatiques et utilisation des mesures de carbone 14 pour tracer l'évolution du cycle du carbone et les changements de la circulation océanique au cours du temps.
- **L'environnement** : datation des archives environnementales, surveillance et mesure de l'impact des activités humaines.

La grotte Chauvet

Découvertes en 1994 au pied d'une falaise dans les gorges de l'Ardèche, les diverses salles de la grotte Chauvet-Pont d'Arc présentent près de 425 figures animales (rhinocéros, lions, mammouths, chevaux...). Les chercheurs ont prélevé et analysé des échantillons de charbons de plusieurs peintures, **mouchages** de torches et résidus de foyers. Ils ont trouvé que la majorité d'entre eux a entre 37 000 et 33 000 ans et, les autres, entre 31 000 et 29 000 ans ; ce qui prouve que le lieu a connu deux vagues d'occupation humaine. Ces datations directes ont incité l'Unesco à classer le site au patrimoine mondial.



Dossiers d'Archéologie
n° 28 - 2015 - Ed. Faton
« La grotte Chauvet »

Les Savanturiers n° 7
« Quand les chercheurs croisent le fer »



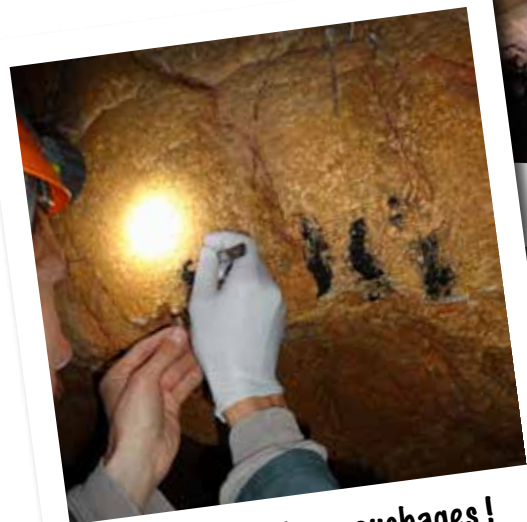
Film « La grotte des rêves perdus » de Werner Herzog - 2011



Prélèvement sur un clivoir égyptien au musée du Louvre.



Têtes de chevaux dans l'alcôve des lions



Ne pas oublier les mouchages !



Un foyer



Hélène



Interview croisée

“ Il y avait déjà des artistes



Hélène Valladas

Géochronologue, archéologue

Formation :

- > Bac S (ancien Bac D)
- > Histoire et archéologie à Paris I
- > Thèse de doctorat d'état (Muséum national d'Histoire naturelle, Paris VI)



Nadine Tisnérat-Laborde

Ingénieur chercheur

Formation :

- > Bac STL
- > BTS Chimie
- > Ecole d'ingénieur à Toulouse
- > Thèse et doctorat en géochimie

Comment a démarré l'aventure de la grotte Chauvet ?

Hélène : La grotte Chauvet a été découverte en 1994. Jean Clottes, archéologue, spécialiste de l'art préhistorique et conservateur au ministère de la Culture, avait effectué quelques prélèvements sur des dessins qu'il a envoyés au laboratoire car nous collaborions avec lui depuis plusieurs années dans l'étude des grottes ornées. Ces échantillons datés, nous avons poursuivi l'étude chronologique de la grotte Chauvet avec ce préhistorien qui a été désigné pour animer l'équipe scientifique. Nous avons été très heureux d'être associés à cette équipe de recherche.

Quel souvenir avez-vous gardé de votre première visite dans la grotte ?

Nadine : La grotte Chauvet était ma première mission, une expérience incroyable ! Le milieu est aussi protégé qu'une banque : il y a une porte blindée, un sas pour revêtir une combinaison afin de ne pas contaminer la galerie par l'introduction de microbes ou de pollen. La grotte n'est pas au niveau de l'entrée, il faut escalader, descendre une échelle sur 25 m. Il n'y a qu'un seul chemin, afin de ne pas piétiner les zones non étudiées. A l'intérieur, il fait noir, l'éclairage ne provient que de nos lampes de poche, ce qui rend la découverte encore plus marquante.

Comment se monte une telle mission ?

Hélène : Nous recherchons des projets qui permettent de faire progresser notre connaissance des cultures de l'homme préhistorique tout en valorisant les méthodes de datations pratiquées au laboratoire.

Nadine : Avec Hélène, nous montons la mission, puis allons chercher les échantillons. Il est important de connaître leur contexte archéologique pour pouvoir les traiter avant de les dater par différentes méthodes, notamment le spectromètre de masse par accélérateur.

Comment s'effectuent le choix et le prélèvement des échantillons ?

Nadine : Les figures sont étudiées en amont avec les archéologues et les spécialistes.

Comme le choix des prélèvements ne porte que sur des objets faits avec du charbon de bois, nous avons donc opté pour les peintures noires. Nous avons prélevé de très petites esquilles de charbon pour que cela ne soit pas visible. Toutefois, il faut prélever suffisamment, afin d'avoir assez de matière pour travailler. Au laboratoire, nous devons être très minutieux et opérer des traitements doux et légers, car les échantillons sont fragiles et précieux.

Qu'avez-vous trouvé ?

Hélène : Au cours de la première campagne, nous avons daté trois peintures et un mouchage de torche. Ces échantillons donnaient un âge bien plus ancien qu'attendu. Beaucoup d'analyses ont été faites depuis, et à chaque fois nous obtenions la même plage chronologique pour les peintures. Nous avons aussi daté des amas de charbon, sans doute des restes de foyers, qui se trouvaient sur le sol dans la galerie des mégacéros. Cet endroit devait être un atelier où étaient fabriqués les fusains. Depuis 1995, notre équipe a daté 71 charbons au sol, 23 peintures et environ une quinzaine de marques, ce qui représente plus de 150 datations.

En quoi la grotte Chauvet est-elle remarquable ?

Hélène : Le bestiaire découvert est très original car il représente des rhinocéros, des lions... Dans l'art pariétal européen, une dizaine était connue jusqu'alors ; à Chauvet, il y en a plusieurs dizaines avec aussi des chevaux, des mammouths...

Les techniques utilisées par les hommes préhistoriques sont remarquables : ils ont préparé la paroi, en la grattant, avant de la peindre. Ainsi le fond calcaire est blanc et les traits ressortent plus noirs, avec de beaux rendus de perspective, d'estompe et de multitude. De plus, les hommes qui ont traversé la grotte au cours de la deuxième période de fréquentation (31 000 à 29 000 ans) ont respecté les peintures réalisées quelques millénaires plus tôt (37 000 à 33 000 ans) par leurs ancêtres.

Aujourd'hui, on est sensible à ce qu'ils ont fait, étonné par le réalisme des figures. Il y avait déjà des artistes !



difficile à atteindre !

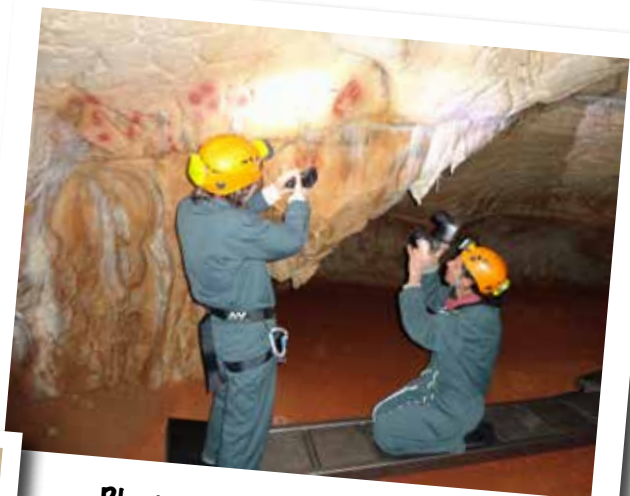


Photo de la main de l'artiste



réalise un prélèvement

YHLEXIQUE TGHKGHJDFSRPLJM

Mouchage : Trace charbonneuse laissée sur les parois après y avoir frotté une torche pour enlever la partie carbonisée et raviver la flamme.

D'autres isotopes

Le carbone 14 n'est pas le seul isotope radioactif utilisé pour dater et étudier l'évolution du climat et de l'environnement.

Dans une chaîne de désintégration, un élément « parent » se transforme progressivement en élément « fils » ; par exemple, l'uranium 238 devient du thorium 234 -> protactinium 234 -> uranium 234 -> thorium 230. La teneur du « parent » décroît tandis que celle du « fils » augmente au cours du temps.

Ainsi, les chercheurs utilisent une méthode basée sur des mesures potassium-argon, ainsi que sa dérivée argon-argon pour les roches ou les minéraux volcaniques (de quelques milliers au milliard d'années). Pour dater les spéléothèmes, ils comptent les isotopes de l'uranium : ^{234}U , ^{238}U , ^{230}Th . En effet, l'uranium est soluble (il entre donc dans la composition des concrétions) alors que le thorium ne l'est pas. Celui mesuré ne peut donc venir que de désintégrations de l'uranium durant les 100 000 années passées... La mesure des isotopes du plomb 210 leur sert à dater des sédiments récents (1 000 ans).

Remonter le temps avec Artémis

Avant les mesures, les échantillons doivent passer par des traitements mécaniques et chimiques, délicatement avec de l'acide puis des bases par exemple, pour éliminer tout matériau contaminant. Suivent des réactions physico-chimiques : combustion ou hydrolyse pour produire du dioxyde de carbone, qui sera ensuite réduit pour obtenir du graphite pur. Cet échantillon sera introduit dans le spectromètre de masse par accélérateur.



1



2



3



4



5

1 L'échantillon prélevé est purifié sous hotte, puis est transformé en CO_2 dans des bancs en verre, et enfin récolté dans des tubes de verre qui seront scellés.

2 Le CO_2 contenu dans les tubes est transformé en carbone pur (graphite) par chauffage en ajoutant de l'hydrogène en présence de fer à $850\text{ }^\circ\text{C}$. L'eau formée est piégée par un mélange azote liquide + éthanol à $-70\text{ }^\circ\text{C}$. Du fer (3 mg environ) est ajouté au carbone (1 mg). La poudre obtenue est mise en pastille dans une cible en aluminium.

3 Les échantillons pastillés sont stockés en attente de montage sur une roue, qui sera contrôlée sous une loupe binoculaire.

4 La roue est montée sur le spectromètre de masse par accélérateur.

5 L'analyse est lancée à partir du poste de commande et chaque mesure enregistrée en continu.

Interview

Comment est composée votre équipe ?

Le Laboratoire de mesure du carbone 14 (LMC14), dont je suis responsable, est composé de 11 personnes réparties en 3 équipes. Elles interviennent sur les échantillons en respectant les phases d'une analyse : préparation, chimie et mesure.

Sur quels échantillons travaillez-vous ?

Pour que la datation au carbone 14 soit possible, les échantillons doivent être d'origine organique : bois, charbon de bois, papier, laine, peau, os... Nous ne pouvons pas dater des roches ou des calcaires qui contiennent du carbone, mais pas de ^{14}C .

Quelles sont les disciplines concernées ?

Nous travaillons pour un grand nombre de dis-

ciplines. Pour certaines, comme l'archéologie, l'environnement, la paléo-climatologie, nous fournissons une date.

Pour d'autres, comme la surveillance de l'environnement autour des centrales nucléaires par exemple, nous donnons la valeur en carbone 14, il s'agit d'une mesure.

Faites-vous vous-même les prélèvements ?

Non, nous sommes un instrument national, au service de la communauté scientifique française. Dans 99 % des cas, les échantillons nous parviennent déjà prélevés. Cependant, nous avons aussi des programmes de recherche propres et dans ce cas, nous allons dans les musées et les monuments historiques, dernièrement la Sainte Chapelle, accompagnés par des archéologues et des conservateurs.

Historiquement, les premières datations ont été faites avec des compteurs proportionnels à gaz. Cette méthode a laissé place à deux techniques complémentaires :

- Le détecteur à scintillation capte le rayonnement émis à chaque désintégration d'un atome de ^{14}C . Cette méthode demande d'utiliser de grandes

quantités de matière (quelques grammes), ce qui est contraignant pour les objets fragiles, petits ou précieux.

- Le spectromètre de masse par accélérateur compte les atomes de carbone (^{12}C , ^{13}C et ^{14}C) dans un milligramme de l'échantillon transformé en graphite.

La tunique d'Argenteuil (relique de la tunique du Christ) et Ötzi, l'homme des glaces mort il y a 5 000 ans, ont été datés grâce à la spectrométrie de masse par accélérateur.



Artémis

Artémis est le spectromètre de masse par accélérateur du laboratoire de mesure du ^{14}C du CEA de Saclay. Instrument national mis au service de 5 partenaires (CEA, CNRS, Institut de recherche et développement (IRD), Institut de radioprotection et sûreté nucléaire (IRSN), ministère de la Culture et de la Communication), il totalise déjà 47 000 datations depuis ses débuts en 2003 !

L'échantillon pastillé est placé dans une source d'ions césium qui le bombardent (A) pour en extraire les ions carbone. Ces derniers sont accélérés (B) puis triés (C) selon leur masse par l'action d'un champ magnétique qui dévie leur trajectoire. Les ions ^{12}C , ^{13}C et ^{14}C , sont comptés (D) sur trois détecteurs distincts. Les mesures sont enregistrées en temps réel.

Le laboratoire travaille depuis quelques années sur la civilisation égyptienne. Une thèse a été menée sur la chronologie des pharaons (cf page 8) et actuellement, nous collaborons à la datation d'un herbier, afin de voir si le carbone 14 a varié selon les régions. Personnellement, je suis allée au Département des antiquités égyptiennes du Louvre prélever sur des instruments de musique et divers objets.

Combien de mesures effectuez-vous par an ?

Nous mesurons 4 500 échantillons par an sur Artémis, dont 3 000 pour nos instituts partenaires. Les échantillons restants nous servent à établir les standards, effectuer des contrôles et optimiser la recherche et le développement.



Lucile Beck

Ingénieur chercheur
Responsable du LMC14

Formation :

- > Bac STL
- > Cours de Sciences physiques à Paris Sud-Orsay
- > Doctorat en physique et formation en archéométrie

ECHOMICADAS

Le laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (CEA-CNRS-Université Versailles-Saint-Quentin), en collaboration avec deux autres laboratoires franciliens, vient de se doter du spectromètre de masse nouvelle génération ECHOMICADAS dédié à la recherche. L'objectif est de mieux comprendre le cycle du carbone et son lien avec le climat, le devenir des ressources en eau, le transfert des contaminants dans l'environnement et les interactions entre sociétés humaines et biodiversité.

Retrouver les dendrochronologistes et les analystes dans le webdocumentaire «Paroles de climatologues»



Egypte ancienne

Une chronologie relative des neuf pharaons qui se sont succédés dans l'Égypte ancienne avait été établie par l'étude de documents **épigraphiques**, historiques et archéologiques. Toutefois, à chaque règne, le décompte des années était remis à zéro, rendant difficile l'établissement d'une chronologie absolue. En 2010, 211 échantillons : paniers, graines, textiles, plantes, fruits ont été datés à travers le monde. Ces analyses ont permis de dresser une chronologie complète et précise de cette période allant de 1570 à 1318 avant Jésus-Christ, entraînant quelques révisions historiques.



VHLEXIQUETG
Epigraphie : Inscription réalisée sur des matières non putrescibles telles que la pierre, l'argile ou le métal.

Et vous, êtes-vous aussi maître du temps ?

Vous êtes archéologue et avez retrouvé un trésor secret enfoui depuis des milliers d'années. Mais combien ? Vous avez besoin du ^{14}C pour le dater.

1. Qu'est-ce que le ^{14}C ?

- a. Cobalt 14
- b. Chlore 14
- c. Carbone 14
- d. Cuivre 14

2. Combien possède-t-il d'isotopes ?

- a. 8
- b. 16
- c. 32

3. Qu'est ce qui ne contient pas de ^{14}C ?

- a. Le bois
- b. Les animaux
- c. Le pétrole

4. De quand datent les peintures rupestres de la grotte Chauvet ?

- a. Entre 2 000 et 3 000 ans
- b. Entre 29 000 et 35 000 ans
- c. Entre 290 000 et 350 000 ans

5. Quel instrument compte les atomes de C ?

- a. Un spectromètre de masse par accélérateur
- b. Un super tamis atomique
- c. Un sélectionneur de molécules

6. En plus de l'archéologie, peut-on mesurer l'impact des activités humaines avec le ^{14}C ?

- a. Oui
- b. Non

Réponses : 1-c ; 2-b ; 3-c ; 4-b ; 5-d ; 6-a

• 6 à 5 bonnes réponses :

Vous êtes un très bon archéologue.

• 4 à 3 bonnes réponses :

Vous êtes un bon archéologue, mais vous pouvez faire mieux.

• 2 à 0 bonnes réponses :

Vous devez réviser encore un peu !

Sites

- CEA : www.cea.fr
- CEA jeunes : www.cea.fr/jeunes
- Retrouvez les Savanturiers en version web, les vidéos et les interviews : <http://cea.fr/go/savanturiers>



Éditeur : Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives, RCS Paris B 775 685 019

Directeur de la publication : Xavier Clément

Conseillers scientifiques : Lucile Beck et Christine Hatté

Ont participé à ce numéro : April Allal, Florence Klotz, Nadine Tisnérot-Laborde, Lucia Le Clech, Hélène Valladas

Crédits photos : Yuvanoé : p.2 - E.Régnier : p.3 - Photodisc : p.3 - L.Beck : p.4 haut - J.-M. Geneste / Ministère de la Culture p.4 - F.Rhodes : p.6 - L.Godart : p.6 - p.7 - D.R. p. 1 - 4 - 5 - 8.

Portraits pages 5 - 7 : M. Klotz

Direction artistique et maquette : S. Martorell
Création, réalisation et impression : FILcom
www.filcom.fr - Décembre 2016 - ISSN 2271-6262

Nous remercions Fabienne Chauvière d'avoir accepté que nous empruntions le titre de son émission.



Ne peut être vendu