

donné sans secondes intercalaires et le Temps universel.

L'abandon des secondes intercalaires perturberait aussi les horloges et les dispositifs de télécommunication où la gestion des secondes intercalaires est intégrée. Des changements statutaires et réglementaires seraient également nécessaires dans les législations nationales, pour lesquelles le temps astronomique est l'étalon explicite ou implicite.

À plus long terme, sans secondes intercalaires, l'écart entre l'UTC, calé sur le temps atomique, et l'UT1, fondé sur le rythme réel du jour et de la nuit, va continuer à croître. L'heure officielle et l'heure vraie indiquée par les mouvements du Soleil vont lentement se décaler. En poussant à l'extrême, si rien n'est fait, il sera un jour midi à minuit, et la date du jour changera en plein milieu de la journée!

Des ajustements encore plus conséquents que les secondes intercalaires, mais plus espacés – des minutes ou des heures intercalaires – seront ainsi indispensables. Il n'est pas *a priori* évident que ces ajustements soient plus faciles à mettre en œuvre que les secondes intercalaires.

Le ciel, gardien du temps

Certes, aucun système de décompte du temps ne peut durer indéfiniment. Même le calendrier grégorien nécessitera un jour des ajustements par l'ajout de jours intercalaires exceptionnels, ou cédera la place à un calendrier plus précis, car ses règles ne sont elles aussi que des approximations des relations astronomiques réelles.

De même, dans sa forme actuelle, le Temps universel coordonné ne fonctionnera plus dans un millier d'années : à cette époque, pour le synchroniser avec le Temps universel, il faudra plus de secondes intercalaires qu'il n'y a de mois où les ajouter ! En effet, si la durée du jour solaire a en moyenne raccourci ces dernières années en raison de phénomènes géophysiques internes à notre planète, sur le long terme, le jour solaire va s'accroître de quelques millisecondes chaque siècle, à cause des forces de marée exercées par la Lune. La durée actuelle du jour astronomique est d'environ 86 400,001 secondes. Nous avons donc besoin d'une seconde intercalaire tous les deux à trois ans. Dans 50 000 ans, le jour astronomique vaudra environ 86 401 secondes. Avec le système actuel,



6. LE TEMPS ATOMIQUE INTERNATIONAL est établi par le Bureau international des poids et mesures (BIPM), situé à Sèvres, près de Paris, à partir des mesures de plus de 300 horloges atomiques réparties dans le monde entier (points rouges). L'insertion des secondes intercalaires pour maintenir le temps atomique à moins de 0,9 seconde du Temps universel, réglé sur la rotation de la Terre, est décidée par l'ERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*), hébergé à l'Observatoire de Paris.

une seconde intercalaire serait alors nécessaire chaque jour !

Il est intéressant d'imaginer comment les générations futures s'adapteront à cette situation. Comme toute technologie, les horloges en disent beaucoup sur les civilisations. Mais le décompte du temps est un problème actuel et continuera à l'être durant les décennies et les siècles à venir. Nous aurons toujours besoin de distinguer la nuit du jour, de diviser nos journées en heures et de fixer la date des événements importants.

Il n'existe pas de consensus dans les milieux industriels et universitaires, ni dans les instances gouvernementales sur la modification du Temps universel coordonné et la suppression des secondes intercalaires. Mais si nous brisons le lien entre le temps et les cycles astronomiques, nous ne sommes pas certains de pouvoir le renouer un jour. Même si les secondes intercalaires étaient supprimées, le problème sous-jacent – comment concilier l'avance constante du temps atomique sur le temps astronomique – ne disparaîtra jamais. En outre, l'UTC reste la base légale du décompte du temps civil dans la plupart des pays ; c'est une convention qui ne devrait pas être modifiée par caprice. Les délibérations de l'ITU-R résoudront-elles ou amplifieront-elles ces problèmes ? Seul... le temps nous le dira. ■

✓ SUR LE WEB

Site de l'ITU :
<http://www.itu.int/home/>

Site du BIPM : <http://www.bipm.fr/>

Site de l'ERS :
<http://hpiers.obspm.fr/>

✓ BIBLIOGRAPHIE

D. Savoie, **Vers une nouvelle échelle de temps ?**, *Revue du Palais de la Découverte*, n° 377, novembre-décembre 2011.

D. Finkleman *et al.*, **The debate over UTC and leap seconds**, *AIAA Paper* 2010-8391, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2010.

D. Savoie, **Dates, ères, styles et calendriers**, *Dossier Pour la Science* n° 42, janvier-mars 2004.
http://bit.ly/doss42_savoie

D. Savoie, **Les cadrans solaires**, Belin, 2003. <http://bit.ly/cadrans>

R. Nelson *et al.*, **The leap second : its history and possible future**, *Metrologia*, vol. 38, pp. 509-529, 2001.

J. Lefort, **La saga des calendriers**, Belin/Pour la Science, 1998.

L'ours spéléologue

Véritable musée de l'ours des cavernes, la grotte Chauvet nous permet de nous représenter cette espèce disparue et d'étudier son mode de vie ainsi que son génome.

Jean-Marc Elalouf et Valérie Féruglio

Il y a 40 000 ans, les premiers hommes modernes d'Europe vivaient dans un environnement très différent du nôtre. La calotte glaciaire de l'Arctique avait une extension considérable et les glaciers des Alpes parvenaient jusque vers Lyon, qui n'existait pas... La faune associée à ce climat froid comportait de nombreuses espèces éteintes. Certaines, comme le mammouth ou l'aurochs, ont survécu après la dernière période glaciaire qui s'est terminée il y a 10 000 ans, tandis que d'autres se sont éteintes avant ou vers la fin de cette période, tels l'hyène ou l'ours des cavernes (*Ursus spelaeus*).

Tout le monde a entendu parler de l'ours des cavernes, mais que savons-nous au juste de cet animal ? Il est possible aujourd'hui de profiter des collections du spectaculaire musée naturel dédié à *Ursus spelaeus* qu'est la grotte Chauvet pour dresser un bilan de nos connaissances sur cet ours préhistorique. Découverte il y a 18 ans en Ardèche, dans le Sud de la France, cette cavité contient au moins 4 000 ossements d'ours des cavernes, issus de 200 individus, et 13 représentations du géant disparu parmi 420 images animalières réalisées par des artistes préhistoriques.

1. L'OURS DES CAVERNES a disparu à la fin de la dernière période glaciaire, assez tard pour que les premiers hommes anatomiquement modernes d'Europe le rencontrent et le dessinent. Ses ossements, qui se sont accumulés par dizaines de milliers dans les grottes d'Europe, se prêtent à des analyses génétiques.

Les chercheurs qui étudient *Ursus spelaeus* disposent ainsi sur un même site de dessins de l'ours des cavernes réalisés il y a plusieurs dizaines de millénaires et d'os de cette même espèce contenant encore de l'ADN.

Aucun autre site connu ne recèle autant d'informations sur ce grand ours préhistorique. Comme nous allons le voir, l'histoire de l'ours des cavernes rappelle un peu celle de l'homme de Neandertal : cet homme robuste apparaît en Europe à peu près à la même époque que l'ours des cavernes, et disparaît aussi durant la dernière période glaciaire. Si l'on cherchait à résumer l'aventure terrestre de l'ours des cavernes dans un cadre chronologique humain, on pourrait, en forçant le trait, qualifier cet animal d'ours de Neandertal !

Une espèce éteinte

L'ours des cavernes était donc proche de son extinction lorsque des *Homo sapiens*, parmi les premiers d'Europe, l'ont représenté sur les parois de la grotte Chauvet. Ces artistes appartenaient à des groupes humains nomades ou semi-nomades, qui tiraient leurs moyens de subsistance de la chasse et de la cueillette.

Les sites d'occupation humaine nous permettent de savoir quels animaux étaient chassés et avec quels outils. Ces sites (abris sous roche, campements de plein air) renseignent ainsi sur la culture matérielle et le mode de vie des hommes préhistoriques. Les grottes, seulement occasionnellement occupées, montrent que l'interaction de l'homme avec l'animal ne se limitait pas à une relation prédateur-proie. Certains animaux, qui ne correspondaient pas forcément aux espèces chassées – et c'est le cas de l'ours des cavernes –, ont été représentés dans les grottes, au moyen de procédés divers et parfois très élaborés. Ces représentations picturales nous livrent quelques éléments de la vie spirituelle d'alors, sans doute aussi l'origine de mythes que les cultures successives ont peu à peu transformés. Et les représentations de l'ours des cavernes ont l'intérêt de fournir une inestimable information : le portrait d'une espèce éteinte.

Disparu durant la dernière période glaciaire à une date sur laquelle nous reviendrons, l'ours des cavernes est redécouvert et « naît » scientifiquement en 1794 grâce aux observations réalisées par Johann Christian Rosenmüller et Johann Chris-

tian Heinroth dans la grotte de Gailenreuth, en Allemagne. Bien que les ossements présents dans cette grotte aient d'abord été attribués à l'homme (!), puis à l'ours polaire, l'identification des os d'ours des cavernes ne présente pas vraiment de difficultés aux paléontologues. Le nom *Ursus spelaeus*, c'est-à-dire littéralement « ours des grottes », provient du fait que les premiers ossements ont été découverts en milieu souterrain, tout comme la quasi-totalité de ceux qui nous sont parvenus.

Plusieurs caractéristiques anatomiques différencient l'ours des cavernes des ours actuels, notamment de l'ours brun (*Ursus arctos*) qui était également présent en Europe durant le Paléolithique. Sa taille, en premier lieu, impressionne : la hauteur au garrot (distance du cou au sol pour un quadrupède) atteignait 1,20 mètre chez nombre d'individus et, dressé sur ses pattes arrière, l'animal pouvait étendre ses griffes à près de trois mètres de haut. La section transversale des os des membres, destinés à supporter le poids de l'animal, était nettement supérieure à celle observée chez l'ours brun. Cela suggère que la masse corporelle pouvait être le triple de celle d'un ours brun et avoisiner 500 kilogrammes chez le mâle.

La taille imposante du squelette et le caractère massif des os ne sont pas les seuls éléments permettant d'identifier l'ours des cavernes. Ils doivent d'ailleurs être relativisés, car la variabilité individuelle apparaît importante (certains sites livrent des individus « nains »), et les femelles étaient beaucoup plus graciles que les mâles. Nous sommes habitués à de telles variations au sein d'une espèce ou d'un sexe à l'autre. Il suffit de comparer, dans l'espèce humaine, un basketteur et un jockey, ou la stature d'un homme à celle d'une femme pour oublier les notions de poids ou taille moyens.

Heureusement, d'autres caractères morphologiques distinctifs sont présents chez l'ours des cavernes, et ceux qui sont susceptibles d'être traduits graphiquement méritent une attention particulière : ils aident à définir ce qui, dans l'art paléolithique, procède du naturalisme. Nous allons notamment porter notre attention sur la tête, car les dessins d'ours ne comportent parfois que cette partie de l'animal.

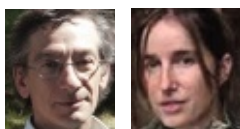
Le premier élément notable est le profil crânien. Contrairement à l'ours brun qui a un front fuyant, l'ours des cavernes a un stop frontal marqué, qui lui donne

L'ESSENTIEL

- ✓ L'ours des cavernes était une espèce d'Europe et d'Asie.
- ✓ Encore abondant il y a 30 000 ans, il disparaît il y a 25 000 à 15 000 ans selon les régions.
- ✓ La grotte Chauvet est le site idéal d'étude de ce grand animal, car elle renferme à la fois des représentations préhistoriques de cette espèce éteinte et de nombreux ossements.
- ✓ Inféodé aux grottes, où il hibernait, l'ours des cavernes était plus grand et plus végétarien que son lointain cousin l'ours brun.
- ✓ Les ours de la grotte Chauvet étaient des spécimens tardifs de l'espèce ; leur diversité génétique était faible.

MCC, CNP Périgueux

LES AUTEURS



Jean-Marc ELALOUF, généticien, dirige l'équipe de paléogénétique de l'Institut de biologie et de technologies de Saclay, au CEA.

Valérie FÉRUGLIO, préhistorienne, est membre de l'équipe Archéologies et sciences de l'Antiquité, de la Maison de l'archéologie et de l'ethnologie à l'Université Paris Ouest Nanterre La Défense.

un profil en marche d'escalier (voir la figure 2c). La mandibule est également discriminante. Chez l'ours des cavernes, son bord inférieur, particulièrement arrondi, évoque une chaise à bascule. L'ouverture nasale est également remarquable, car elle est orientée vers le haut. Enfin, les orbites sont de dimension plus réduite que chez l'ours brun, ce qui suggère que l'œil était de petite taille.

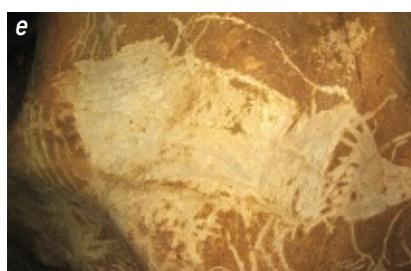
Si l'on pense maintenant à l'animal couvert de poils, on conçoit aisément que l'œil était difficilement perceptible par l'observateur. Tous ces éléments (profil frontal en escalier, mandibule arrondie, ouverture nasale vers le haut, œil quasi invisible) concourent à établir que c'est bien l'ours des cavernes qui est représenté dans la grotte Chauvet. Lorsque la représentation est complète, le caractère massif des membres, et le rapport des antérieurs aux postérieurs qui confère un arrière-train bas, nous donnent une idée de l'allure générale de l'animal (voir les figures 2 et 4).

Les grottes contenant des ossements d'ours des cavernes (voir la figure 5) livrent

généralement peu d'autres vestiges de mammifères. Cette donnée, apparemment anecdotique, est significative à plus d'un titre. Tout d'abord, elle nous fait prendre conscience qu'en définitive peu d'animaux fréquentaient de façon régulière les grottes profondes. En deuxième lieu, elle met en évidence une répartition de l'espace souterrain entre les espèces : les grottes occupées par l'ours des cavernes contiennent peu d'indices de fréquentation par l'hyène des cavernes, et inversement.

Hibernation en grotte, pas dans une tanière

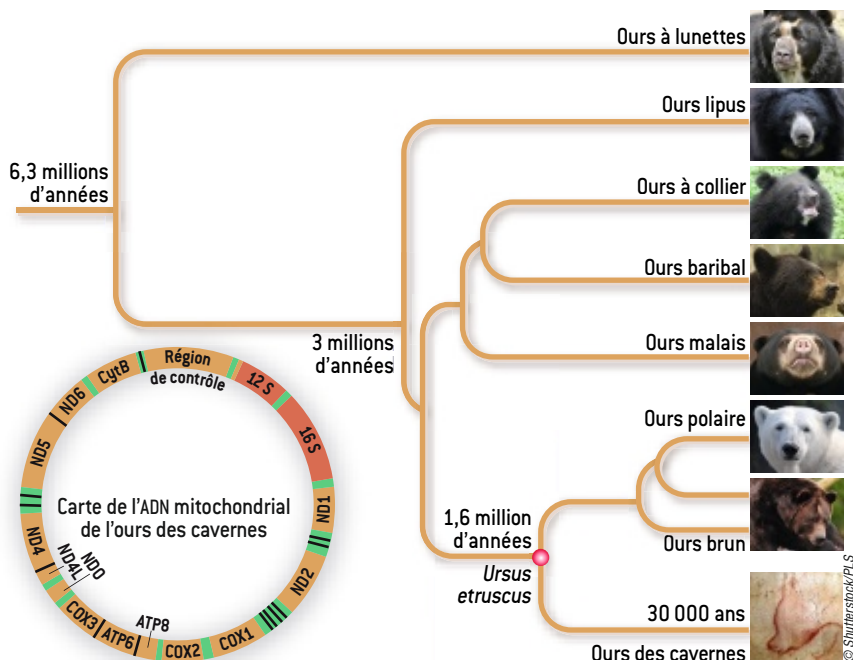
Enfin, la prédominance systématique dans les « grottes à ours » d'ossements d'ours des cavernes, par rapport à ceux d'ours brun, révèle une différence supplémentaire entre les deux espèces. L'observation des ours bruns actuels nous en donne la clef : au moment du sommeil hivernal, l'ours brun choisit une tanière qui consiste la plupart du temps en un trou à proximité d'un arbre mort. Il ne montre pas d'at-



2. LONGUE DE 500 MÈTRES ET LARGE D'ENVIRON 50, la grotte Chauvet contient plus de 400 œuvres pariétales qui figurent souvent des animaux dangereux, dont l'ours représenté 13 fois. Ci-dessus à gauche, la topographie de la grotte ainsi que la répartition des empreintes laissées

par des ours. Les représentations incluent deux ours noirs dessinés au charbon de bois (a, b), dont un marqué de griffades d'ours (a), deux ours rouges dessinés à l'ocre (c, d), un profil d'ours peu distinct (e) gravé sur une paroi meuble et un curieux ours tacheté (f).

Notre description de la grotte type ne tient pas compte des contingences variées qui ont pu altérer un site occupé il y a plusieurs dizaines de milliers d'années. Dans certains cas, les ossements auront disparu, car les sols, trop acides, sont impropres à leur conservation (Dordogne). Ailleurs, les empreintes auront été effacées et les bauges détruites. Ces altérations peuvent être naturelles (ennoyage) ou liées aux activités humaines. Si la grotte est restée ouverte, des fréquentations humaines durant plusieurs siècles n'auront pas manqué de se produire et sont attestées par des



L'une des principales questions que l'on se pose à propos de l'ours des cavernes est celle de son histoire évolutive et de sa parenté avec les autres espèces d'ours. L'analyse quantitative de la morphologie des os et des dents a longtemps été le seul moyen de déterminer les relations phylogéniques entre *Ursus spelaeus* et les autres

Apparu il y a près d'un million d'années, l'ours brun a connu un beau succès évolutif. Originaire d'Asie, il a en effet occupé l'Ancien et le Nouveau Monde et s'est diversifié en nombreuses lignées (lignées européennes, grizzly, kodiak...). Apparue il y a 150 000 ans, la plus récente d'entre elles correspond à l'ours polaire



MCC. CNP Périgueux

4. CE DESSIN est l'une des représentations de l'ours des cavernes réalisées par les Aurignaciens, il y a plus de 30 000 ans en Ardèche. Elle montre le stop frontal caractéristique de ces animaux, ainsi que l'arrière-train plus bas par rapport aux épaules que chez l'ours brun. Les oreilles sont petites et rondes et la bosse de graisse, précieuse réserve d'hibernation, est visible au niveau des épaules. Les yeux, vraisemblablement très petits, ne sont pas représentés.



MCC. CNP Périgueux

5. CET AMAS D'OS D'OURS DES CAVERNES trouvé dans la grotte Chauvet est un exemple de ceux que l'on trouve en abondance dans les grottes d'Europe. L'accumulation d'ossements s'explique par la mort, au cours de l'hibernation, d'animaux fragiles (ours âgés ou malades, oursons) ou qui n'avaient pu accumuler suffisamment de graisses pendant l'été. L'association de squelettes de femelles et de nouveau-nés suggère que la mise bas avait lieu durant l'hibernation.

(*Ursus maritimus*), le seul ours actuel qui ait un régime strictement carnivore. L'ours des cavernes apparaît plus tardivement que l'ours brun. La lignée spéléoïde comporte en particulier *Ursus deningeri*, qui précède l'ours des cavernes au sens strict. Ce dernier aura donc finalement eu une existence assez brève. Il apparaît il y a 300 000 ans en Europe, territoire qu'il ne quittera pratiquement pas, et disparaît à la fin de la dernière période glaciaire.

Son ADN mitochondrial a été séquencé

Le séquençage de l'ADN de l'ours des cavernes a progressé récemment grâce à la caractérisation complète de son génome mitochondrial. Ce génome circulaire (voir la figure 3) est le plus couramment analysé par les paléogénéticiens pour des raisons pratiques et théoriques. D'un point de vue expérimental, il est relativement facile à étudier, car il est compact (200 000 fois plus petit que le génome nucléaire), et surtout très abondant : une cellule animale peut contenir 1 000 exemplaires du génome mitochondrial, alors qu'elle ne possède que deux copies du génome nucléaire (une de chaque parent).

Cette abondance du génome mitochondrial est particulièrement intéressante pour les échantillons archéologiques, dont l'ADN est dégradé. On a ainsi 1 000 fois plus de chance de récupérer un génome mitochondrial qu'un génome nucléaire complet. Du point de vue théorique, l'intérêt de ce génome réside dans son évo-



MCC. CNP Périgueux

6. DEUX PLANTIGRADES, dont un bipède (l'homme, a) et un quadrupède (l'ours des cavernes, b), ont pénétré dans la grotte Chauvet. L'ours venait pour hiberner. L'homme venait probablement en été, quand l'ours n'y était pas.

lution rapide (certaines de ses régions comportent des fragments hypervariables) et dans sa transmission exclusive par la lignée maternelle, qui facilite l'analyse des processus évolutifs.

Le premier génome mitochondrial d'ours des cavernes déposé dans la banque américaine de gènes en libre accès *GenBank* provient d'un spécimen de la grotte Chauvet. Sa comparaison avec le génome des ours actuels, dont l'ours polaire et plusieurs lignées d'ours bruns, montre que l'ours des cavernes appartient à une lignée distincte de celle des ours bruns.

Ces analyses génétiques montrent aussi que l'ours des cavernes est une espèce

apparue anciennement (voir la figure 3). À quelle époque ? Avec un génome mitochondrial complet, on dispose d'une séquence moléculaire suffisamment longue pour dater, au moyen de simulations informatiques, le moment où deux lignées s'engagent dans des voies évolutives distinctes. Ces simulations indiquent que les lignées de l'ours brun et de l'ours des cavernes ont divergé il y a 1 à 2,1 millions d'années, la valeur la plus probable étant 1,6 million d'années.

Les derniers spécimens connus d'*Ursus etruscus* ont 1,2 million d'années, tandis que les plus anciens ours bruns ont 900 000 ans. Dans l'état actuel des connaissances, *Ursus etruscus* peut donc prétendre au titre de dernier ancêtre commun à l'ours brun et à l'ours des cavernes.

Nous connaissons ainsi un peu mieux l'ours des cavernes et ses ancêtres et, grâce aux dessins de la grotte Chauvet, nous pouvons même nous l'imaginer de façon précise. On peut maintenant se demander quand il a disparu et pourquoi.

Les scientifiques ont noté depuis longtemps que l'ours des cavernes était encore abondant il y a 30 000 ans, puis qu'il s'est vite raréfié. Les opinions divergent sur la date d'extinction de l'espèce, les positions extrêmes situant cette extinction il y a 24 000 ans, ou tout à la fin de la dernière période glaciaire, il y a 10 000 ans. Examinons les informations livrées par la grotte Chauvet et comparons-les à celles obtenues dans une autre grotte des gorges de l'Ardèche, la grotte des Deux-Ouvertures, pour étendre notre analyse à

un cadre régional. L'ADN mitochondrial des ours des cavernes de ces deux sites présente une faible diversité génétique, limitée à deux lignées maternelles.

Cette constatation, déjà frappante, devient particulièrement informative lorsqu'on met en parallèle l'âge des échantillons étudiés. Il s'agit en effet dans les deux sites de spécimens tardifs de l'espèce, qui ont vécu il y a 27 000 à 32 000 ans (quelques spécimens plus anciens sont présents à Chauvet, mais ils ne contiennent plus d'ADN). Pour comprendre la signification de ces résultats, il faut introduire un niveau de comparaison supplémentaire : les sites contenant des spécimens plus anciens. Une telle analyse révèle par exemple pour la grotte de Pestera cu Oase (Roumanie), il y a 45 000 ans, une diversité génétique plus grande et une population de taille effective dix fois plus importante.

Les caractéristiques de la population ardéchoise d'ours des cavernes sont donc celles d'une espèce menacée, que l'on s'attend à voir disparaître prochainement.

Pourquoi a-t-il disparu ?

La grande quantité d'os d'ours des cavernes à Chauvet (200 individus) ne doit pas faire illusion. Il suffit d'un individu mort tous les 20 ans pendant 4 000 ans pour obtenir cette accumulation. Il est donc possible que l'ours des cavernes n'ait jamais été abondant en Ardèche pendant l'Aurignacien (culture matérielle de l'homme moderne en Europe, il y a 35 000 à 28 000 ans environ) et qu'il ait disparu de la région peu après.

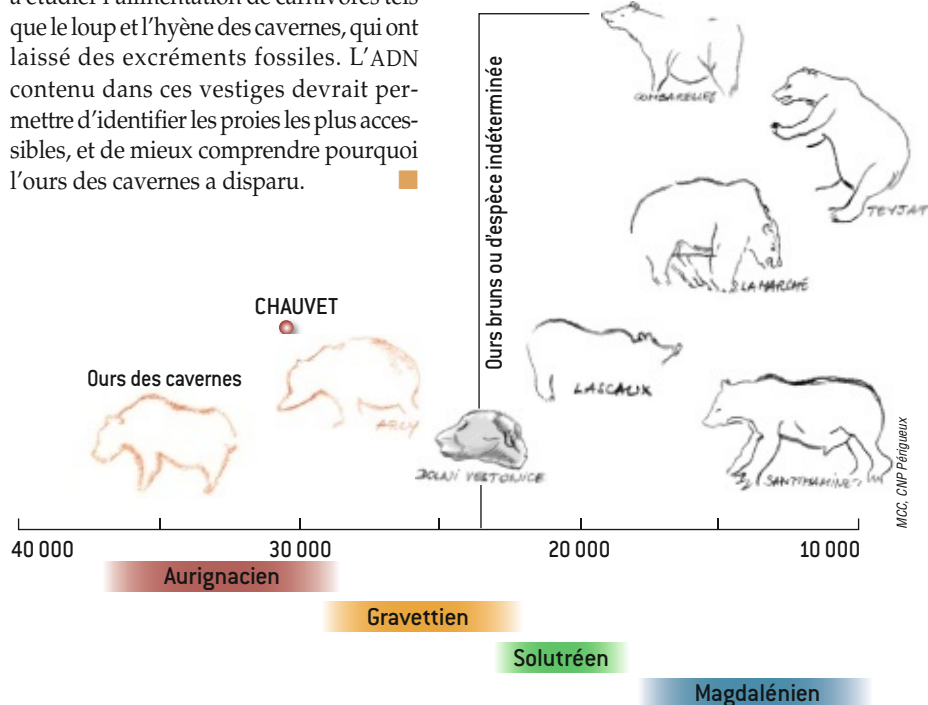
De fait, il est aujourd'hui assez clair que, après avoir été dessiné dans la grotte Chauvet, l'ours des cavernes est devenu trop rare pour être observé attentivement par les artistes du Paléolithique. Lorsqu'ils sont venus dans la grotte Chauvet il y a 25 000 à 27 000 ans, les porteurs de la culture gravettienne (la culture matérielle qui succède à l'Aurignacien, il y a 30 000 à 24 000 ans) ont fréquenté les mêmes secteurs que leurs prédécesseurs, notamment le diverticule où sont représentés des ours. Ils ont donc vu le portrait d'un animal peint plusieurs milliers d'années auparavant par les Aurignaciens. L'ont-ils considéré comme un portrait peu représentatif de l'ours brun, ou se sont-ils posé des questions sur la permanence des espèces ? Quoi qu'il en soit, leur art n'a plus fourni de représentations

naturalistes de l'ours des cavernes comparables à celles des Aurignaciens, ou bien c'est un autre animal, l'ours brun, qui a été dessiné (voir la figure 7).

L'homme moderne a-t-il joué un rôle dans la disparition d'*Ursus spelaeus* ? Nous manquons d'arguments pour l'affirmer. La chasse à l'ours des cavernes ne semble jamais avoir été intensive, tandis que la compétition avec l'homme pour les espaces souterrains, possible pour un seul site, n'est guère plausible à l'échelle d'une région aussi riche en cavités que l'Ardèche. Le déclin des populations d'ours des cavernes semble en outre avoir commencé avant l'arrivée d'*Homo sapiens* en Europe.

La fragmentation de la population d'*Ursus spelaeus* en groupes d'effectifs limités, isolés géographiquement, a pu conduire à des phénomènes de consanguinité, contribuer à l'accroissement des pathologies et précipiter l'extinction. On peut aussi se demander si l'ours des cavernes n'a pas été en partie victime de son mode de vie. L'absence d'exposition au soleil plusieurs mois consécutifs contribue au rachitisme, et l'hibernation exige des réserves de graisse suffisantes. Durant les semaines précédant l'hibernation, l'ours des cavernes avait ainsi besoin d'accéder à une alimentation carnée qui, peut-être, manquait parfois.

Pour tester cette idée, une piste consiste à étudier l'alimentation de carnivores tels que le loup et l'hyène des cavernes, qui ont laissé des excréments fossiles. L'ADN contenu dans ces vestiges devrait permettre d'identifier les proies les plus accessibles, et de mieux comprendre pourquoi l'ours des cavernes a disparu.



7. CETTE FRISE CHRONOLOGIQUE suggère qu'après le Gravettien, les hommes préhistoriques ne représentaient plus clairement l'ours des cavernes, mais soit des ours bruns (Les Combarelles, La Marche, Teyjat, Lascaux, Santimamiñe), soit des ours d'espèce non identifiable (Dolní Vestonice).

BIBLIOGRAPHIE

J. Clottes (sous la dir. de), *La Grotte Chauvet. L'art des origines*, Seuil, 2010.

C. Bon *et al.*, *Deciphering the complete mitochondrial genome and phylogeny of the extinct cave bear in the Paleolithic painted cave of Chauvet*, *PNAS*, vol. 105, pp. 17447-17452, 2008.

C. Bon *et al.*, *Low regional diversity of late cave bears mitochondrial DNA at the time of Chauvet Aurignacian paintings*, *J. Archaeol. Sci.*, vol. 38, pp. 1886-1895, 2011.

J. Jaubert, *Préhistoires de France*, Confluences, 2011.

J. Clottes, *Pourquoi l'art préhistorique ?*, Gallimard, 2011.

Les isolants de Mott, des conducteurs bloqués

Antonio Tejeda et Arantzazu Mascarague

Certains conducteurs électriques deviennent isolants quand on modifie la pression ou la température.

Les physiciens tentent de mieux comprendre ce phénomène en l'étudiant sur des matériaux bidimensionnels.

Les alchimistes voulaient changer le plomb en or, mais cela s'est révélé être une chimère. Il est toutefois possible de changer certains conducteurs électriques en isolants, ce qui est en fait aussi étonnant que le grand œuvre des alchimistes...

Ces conducteurs, des métaux qui se muent en isolants quand on baisse la pression ou la température, alors qu'ils devraient, selon les critères théoriques usuels, rester conducteurs, sont nommés isolants de Mott. Le changement qui fait passer ces matériaux de l'état de conducteur à celui d'isolant et *vice versa* est ce que les physiciens nomment une transition de phase. Comment ont débuté et progressé les recherches sur la transition métal-isolant ? Où en est-elle aujourd'hui ? C'est ce que nous allons examiner ici. Nous verrons en particulier que les physiciens étudient actuellement une classe d'isolants de Mott où la transition ne concerne que la surface du matériau et dont les détails sont accessibles à l'analyse expérimentale et théorique. C'est dans un tel système, une surface de germanium recouverte d'une monocouche ordonnée d'atomes d'étain, que nous avons découvert en 2006 une transition métal-isolant, liée à l'évolution de la répartition des atomes d'étain avec la température.

L'ESSENTIEL

✓ Les isolants de Mott passent de l'état conducteur à celui d'isolant quand on change la température ou la pression.

✓ L'état isolant de ces matériaux s'explique en tenant compte des interactions des électrons dans le réseau cristallin.

✓ Comme l'indiquent des études en deux dimensions, la transition conducteur-isolant est liée à une modification de la structure cristalline du matériau.

Albert Marini/Investigation y Ciencia

Les isolants de Mott sont une anomalie parmi les matériaux conducteurs, isolants ou semi-conducteurs. Pour bien saisir pourquoi, évoquons d'abord les principes de construction de ce pan si important de la physique des solides du XX^e siècle qu'est la « théorie des bandes », et soulignons lequel se révèle faux dans le cas des isolants de Mott.

Initialement, la théorie des bandes a été développée pour décrire les conducteurs métalliques. Dans ces matériaux, la fonction décrivant l'état quantique d'un électron mobile – la « fonction d'onde » ou l'« orbitale électronique » de cet électron – est délocalisée. Cela signifie que l'espace où peut se trouver un tel électron de conduction s'étend à tout le matériau : il n'est pas attaché à un atome particulier. En outre, dans un tel conducteur, la superposition des orbitales a pour résultat que les énergies possibles pour les électrons sont réparties en bandes permises, séparées par des bandes interdites. Ainsi, les électrons délocalisés ont non seulement leurs énergies dans la bande de conduction (la bande permise la plus haute dans l'échelle des énergies), mais ils sont aussi partagés entre un grand nombre des atomes du matériau.

La théorie des bandes a toute une histoire qui s'achève en 1928 avec la contribu-