

permet de tomographier à distance des volcans dangereux, par exemple la Soufrière Hills de Montserrat. Toutefois, la tomographie par muons présente un inconvénient : elle n'est pas applicable partout.

Elle est bien adaptée au dôme de la Soufrière, qui a un diamètre de l'ordre du kilomètre et dont les pentes sont abruptes. Le flux de muons est suffisant pour obtenir en un mois une série de données exploitables. En revanche, un volcan de type bouclier comme le Piton de la Fournaise, à la Réunion, est moins adapté, car sa base est large de plusieurs kilomètres et ses pentes sont plus douces.

Dès lors, le flux de muons est fortement atténué par l'épaisseur de la roche, et il faudrait recueillir les données durant plusieurs mois, voire quelques années, pour commencer à distinguer les structures internes. Lors de l'expérience que nous avons réalisée sur l'Etna, volcan culminant à 3 300 mètres d'altitude, nous avons dû limiter notre étude à l'un des cratères sommitaux, le cratère Sud-Est, dont les dimensions sont comparables à celles de la Soufrière de Guadeloupe.

La tomographie par muons serait-elle applicable à d'autres objets que les volcans ? Oui, à condition de pouvoir aligner le flux de muons cosmiques, l'objet et le détecteur. D'autres applications sont envisageables, et un télescope a récemment été installé dans le laboratoire souterrain de l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire, IRSN, à Tournemire, pour caractériser les roches présentes au-dessus des galeries.

De la Soufrière au suivi des nappes phréatiques

La méthode pourrait servir à caractériser le milieu recouvrant des sites de stockage géologique ou à évaluer des ressources minières. Les mesures effectuées en continu sur la Soufrière ont également montré la possibilité d'observer des variations de densité. La méthode permettrait aussi d'évaluer les dimensions de nappes phréatiques et de suivre leurs fluctuations, ou encore de surveiller les sites de stockage de dioxyde de carbone. Cette toute jeune méthode devrait trouver de nombreuses applications !

BIBLIOGRAPHIE

N. Lesparre *et al.*, **Density muon radiography of La Soufrière of Guadeloupe : First results and comparison with other tomography methods**, *Geophys. J. Int.*, vol. 190, pp. 1008-1019, 2012.

J. Marteau *et al.*, **Muons tomography applied to geosciences and volcanology**, *Nucl. Instrum. Methods A*, vol. 695, pp. 23-28, 2011.

N. Lesparre *et al.*, **Geophysical muon imaging : feasibility and limits**, *Geophys. J. Int.*, vol. 183, pp. 1348-1361, 2010.

J. Paul et J.-L. Robert-Ésil, **Le roman des rayons cosmiques**, Ellipses, 2009.

P. De Wever *et al.*, **Le volcanisme cause de mort et source de vie**, Vuibert, 2003.



À LA DÉCOUVERTE DES JOIES ET DES EXIGENCES DU BEAU MÉTIER DE CHERCHEUR !

Le prix *Le Monde* de la recherche universitaire a distingué 5 lauréats, qui nous racontent les raisons de leur engagement, le déroulement de leur travail et leurs résultats. Cinq « aînés » resituent ces travaux dans le tissu scientifique actuel, composant ainsi un véritable paysage de la science contemporaine.

PRÉFACE DE PIERRE LÉNA

Partenaires du prix



Fondation Charles Léopold Mayer
pour le Progrès de l'Homme

FONDATION
CREDIT COOPERATIF
FONDATION D'ENTREPRISE

Le Monde

SCIENCE

5 JEUNES CHERCHEURS D'AVENIR

en immunologie, cosmologie, sciences de la Terre,
mécanique quantique et sciences cognitives
PRÉFACE DE PIERRE LÉNA

PRIX Le Monde DE LA RECHERCHE

**JULIE SCHULTHESS, JESSICA FLAHAUT,
NOLWENN LESPARRÉ, SIMON PIGEON
ET LAURENT CLERET DE LANGAVANT**

Présentés par leurs aînés :
Jean-François Bach, Francis Rocard,
Claude Jaupart, Jean-Michel Raimond
et Olivier Houdé



[PRÉFACE DE PIERRE LÉNA ET LE POMMIER !]

Éditions Le Pommier 2013 - 198 pages - 20 €



Rendez-vous sur notre site internet !

De nombreux oiseaux migrateurs parcourent plusieurs milliers de kilomètres en voyageant la nuit. Comment surmontent-ils une telle épreuve ?

La migration nocturne une épreuve extrême

Paul Bartell et Ashli Moore

Imaginez-vous sur un long vol de nuit. Les turbulences et le manque de confort vous empêchent de dormir. Lorsque vous arrivez à l'aéroport au petit matin, vous êtes déshydraté et de mauvaise humeur, mais une journée de réunions importantes vous attend. Le soir, vous ne souhaitez rien d'autre qu'une douche chaude et un long sommeil. Malheureusement, vous devez retourner à l'aéroport pour un autre vol de nuit.

Vous supporterez un tel programme de temps en temps, mais imaginez que ce soit votre rythme quotidien : travail de jour et vol de nuit, pendant plusieurs semaines d'affilée. Imaginez aussi qu'il n'y ait ni boissons ni nourriture à bord de l'avion. Et dernier détail : c'est vous qui fournissez l'énergie nécessaire au vol en pédalant sur un vélo fixe.

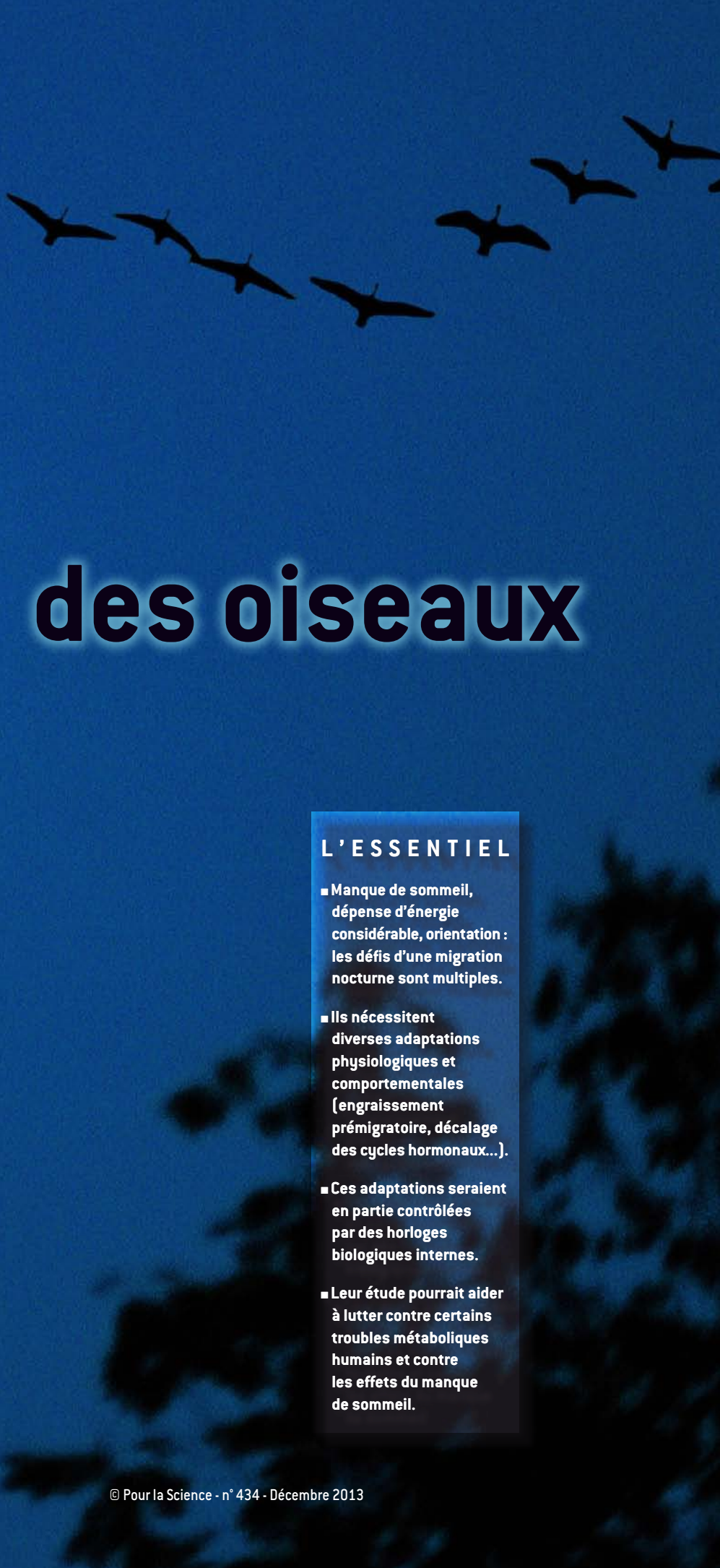
C'est bien sûr impossible. Pourtant, des milliards d'oiseaux accomplissent

une performance similaire deux fois par an, lorsqu'ils migrent entre leurs sites de reproduction d'été et leurs zones d'hivernage. Parmi les 700 espèces d'oiseaux au moins qui nichent en Amérique du Nord, plus de 400 migrent (contre environ 200 en France). Dans le monde entier, les oiseaux migrateurs déclinent plus vite que les autres. Comprendre les défis auxquels ils sont confrontés est capital pour leur protection.

La migration requiert de spectaculaires changements saisonniers de comportement et de physiologie. À la fin de l'été, après l'envol des oisillons, les oiseaux muent et remplacent leurs plumes, anciennes et abîmées, par de nouvelles. En outre, ils se nourrissent abondamment – on parle d'hyperphagie. Cette quête de nourriture se traduit par une activité frénétique à cette époque de l'année. L'hyperphagie

des oiseaux s'accompagne d'importants changements de la masse et de la composition de leur corps, qui devient très gras.

Les oiseaux partent ensuite pour un voyage de plusieurs semaines. Ils passent l'hiver dans des régions plus chaudes, qui leur offrent des ressources suffisantes. Puis ils muent à nouveau, avant une autre période d'hyperphagie de plusieurs semaines. Quand la durée des jours et la température ont assez augmenté, ils repartent en migration vers des sites de reproduction. À leur arrivée, les mâles délimitent des territoires. Des couples se forment, construisent des nids et pondent des œufs. Bientôt, ceux-ci éclosent, et les parents consacrent presque toute leur énergie à nourrir les poussins. Si le temps le permet, ils peuvent s'accoupler de nouveau et avoir une seconde couvée. Puis le cycle recommence (*voir la figure 1*).



des oiseaux

L'ESSENTIEL

■ Manque de sommeil, dépense d'énergie considérable, orientation : les défis d'une migration nocturne sont multiples.

■ Ils nécessitent diverses adaptations physiologiques et comportementales (engraissement prémigratoire, décalage des cycles hormonaux...).

■ Ces adaptations seraient en partie contrôlées par des horloges biologiques internes.

■ Leur étude pourrait aider à lutter contre certains troubles métaboliques humains et contre les effets du manque de sommeil.

À l'évocation du mot migration, on pense souvent à une formation d'oiseaux en V. Cependant, dans de nombreux cas, les migrations d'oiseaux sont difficiles à observer. Ainsi, la plupart des passereaux (des oiseaux chanteurs et d'autres espèces apparentées) migrent de nuit. Quels sont les avantages de telles migrations nocturnes ? Comment les oiseaux en supportent-ils les contraintes physiologiques et de quelle façon s'orientent-ils ? Quand dorment-ils ? Des études récentes ont apporté quelques réponses, mettant notamment en évidence le rôle des horloges biologiques internes.

Les humains prennent des vols de nuit pour les divers avantages qu'ils offrent, tels des billets moins chers ou la possibilité de passer la journée sur le lieu de destination. Dans une étude publiée en 2011, Guy Beauchamp, de l'Université de Montréal, a analysé les migrations diurnes ou nocturnes de multiples oiseaux d'Amérique du Nord. Ses résultats suggèrent qu'un voyage de jour est bénéfique pour les espèces sociales, qui migrent en grands ensembles et restent groupées parce que les oiseaux voient leurs congénères. Les migrations nocturnes, quant à elles, permettraient d'éviter les prédateurs, de minimiser le stress thermique et les pertes d'eau par évaporation, et de réduire les dépenses énergétiques (en raison d'une plus faible turbulence de l'air). Ce serait particulièrement avantageux pour les petits oiseaux ; et, de fait, la plupart d'entre eux migrent de nuit. En outre, voler la nuit libère une partie de la journée pour la quête de nourriture.

Des ombres devant la Lune

Comment sait-on que des oiseaux migrent la nuit ? On a d'abord remarqué que des groupes d'oiseaux changent d'endroit entre le soir et le lendemain matin. Depuis les années 1880, des ornithologues étudient les vols nocturnes en observant la Lune et en attendant que des oiseaux passent devant elle. On répertorie aussi les cris d'oiseaux en vol entendus la nuit : une liste a été publiée en 1899, mais cette technique n'a pris son essor que dans les années 1950, grâce à des avancées en matière d'enregistrement des sons. Lors du développement des radars, dans les années 1940, des « signaux fantômes » se sont révélés être des oiseaux migrants ; depuis, le radar est très utilisé pour l'étude des migrations. Nombre de

© John Churchman/Corbis

■ LES AUTEURS



Paul BARTELL est maître de conférences en biologie aviaire à l'Université de Pennsylvanie, aux États-Unis.

Ashli MOORE est chercheuse à l'Université de Pennsylvanie.

Article publié avec l'aimable autorisation de la revue *American Scientist*.

ces méthodes sont encore en service ; elles ont juste été un peu perfectionnées.

L'activité migratoire nocturne est aussi étudiée en laboratoire, où diverses manifestations physiologiques et comportementales persistent. En période de migration, les oiseaux qui la pratiquent ont des comportements stéréotypés pendant la nuit, nommés *Zugunruhe* (littéralement, inquiétude migratoire). Ils battent par exemple rapidement des ailes, comme s'ils s'apprêtaient à s'envoler d'un perchoir. Le terme *Zugunruhe* a été inventé par des aviculteurs allemands ; ceux-ci avaient capturé des oiseaux sauvages et observé ce comportement, qui endommageait les plumes des oiseaux, à certaines époques de l'année. Le jour, les oiseaux captifs ont un comportement bien distinct consistant à sautiller ou à se nourrir.

En dehors des périodes migratoires, la plupart des passereaux migrant de nuit ne sont actifs que pendant la journée. Comme chez tous les animaux, une horloge interne, synchronisée sur le cycle quotidien d'alternance de la lumière et de l'obscurité, contrôle les comportements d'activité et de repos. Elle est dite circadienne, mot construit à partir des termes latins *circa* et *diem* (« environ un

jour »). Cette horloge est contrôlée par un ensemble de gènes (voir l'encadré page 58), dont l'expression peut être régulée par des stimulus externes tels que la lumière.

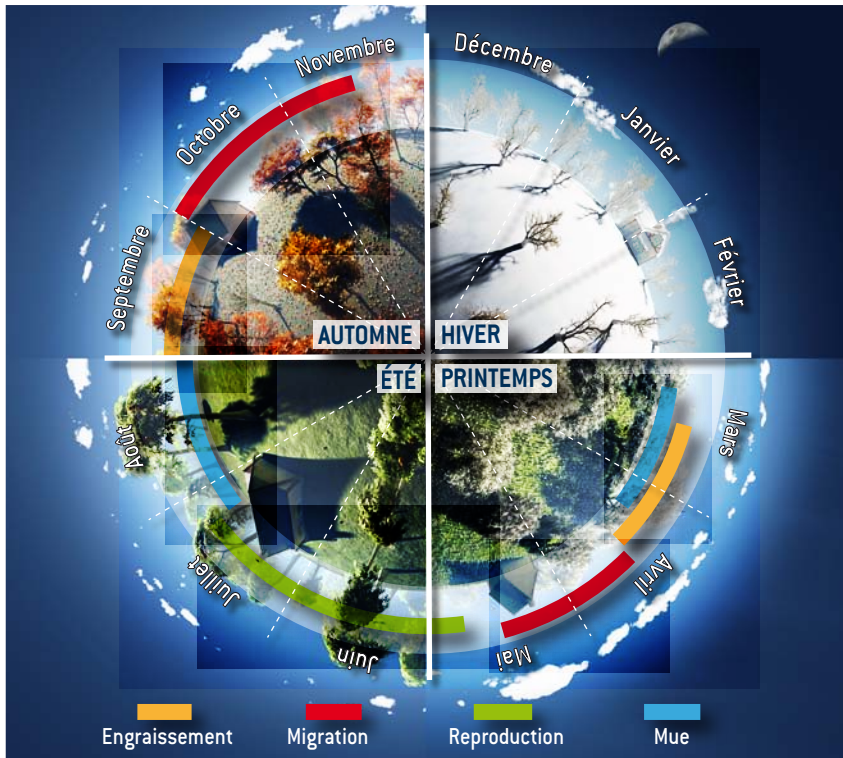
Durant la migration, les oiseaux deviennent actifs à la fois le jour et la nuit. Ce changement, qui survient avec les changements de saisons, entraîne une réorganisation physiologique et comportementale notable. L'horloge circadienne envoie-t-elle alors des signaux différents à l'organisme ? Ou le cerveau et le corps réagissent-ils différemment à ses signaux pendant la période migratoire ?

Un comportement réglé comme une horloge

Les ressorts neurobiologiques du comportement migratoire nocturne sont mal connus, mais avec l'ornithologue allemand Eberhard Gwinner (1938-2004), de l'Institut Max Planck, en Allemagne, l'un de nous (P. Bartell) a montré qu'une horloge circadienne contrôle le comportement de *Zugunruhe*. Lorsque le cycle lumière-obscurité est remplacé par une faible lumière constante au cours du temps, les activités d'un oiseau se déroulent selon un cycle d'environ 24 heures. Cela indique que ces activités sont contrôlées par une horloge interne.

En dehors des périodes migratoires, il n'y a qu'un seul pic d'activité par cycle, contre deux pics pendant ces périodes. L'horloge circadienne qui contrôle l'activité migratoire nocturne est distincte de celle qui contrôle l'activité diurne, du moins chez les espèces étudiées. Leurs interactions, qui dépendent de la saison, déterminent si l'oiseau manifeste ou non un comportement de *Zugunruhe* et une activité migratoire.

Gwinner et Leonida Fusani, de l'Université de Ferrare, en Italie, ont montré que durant la période migratoire, l'activité nocturne dépend aussi des réserves d'énergie et de la nourriture disponible. Les oiseaux doivent parfois se reposer et se ravitailler sur des sites de halte migratoire. Lorsque des oiseaux maigres trouvent un endroit où la nourriture abonde, ils suspendent parfois leurs vols nocturnes pendant plusieurs jours et restent sur place jusqu'à ce qu'ils aient recouvré un poids suffisant. Ce n'est pas le cas quand la nourriture est rare sur le site de halte : les oiseaux se remettent alors rapidement en chemin. Ainsi, des stimulus externes influent sur les comportements contrôlés par les horloges biologiques.



1. LE CYCLE ANNUEL D'UN OISEAU MIGRATEUR (ici le bruant à gorge blanche, *Zonotrichia albicollis*) comprend deux périodes de migration, au printemps et à l'automne. À la fin de l'été, après la reproduction, les oiseaux changent de plumage et grossissent en se nourrissant d'aliments gras, afin de stocker l'énergie nécessaire à leur vol vers des climats plus chauds. À la fin de l'hiver, les oiseaux muent et engraisser de nouveau, avant de retourner sur leurs sites de reproduction.

Le comportement migratoire nocturne est saisonnier : il se manifeste à l'automne, puis au printemps. Les variations de la durée du jour, ou photopériode, constituent un signe environnemental fiable et précis du moment de l'année. Elles sont d'autant plus prononcées que l'on est loin de l'équateur. Nombre d'organismes de la zone tempérée y sont sensibles, y compris des plantes, des insectes et des vertébrés.

Au printemps, l'allongement des jours incite les oiseaux à passer des activités d'hivernage à la mue pré migratoire, l'engraissement et la migration ; il entraîne aussi un développement des gonades, qui favorisera la reproduction. On a bien plus étudié le contrôle photopériodique de la reproduction que celui de la migration, mais certains principes sont les mêmes. La mesure de la photopériode s'effectue *via* l'horloge circadienne. Dans la nature, seuls les jours d'une longueur suffisante déclenchent des réactions telles que la migration ou la reproduction. En laboratoire, on peut provoquer ces réactions en éclairant un oiseau à différents moments de sa « nuit interne » – contrôlée par son horloge biologique –, afin de simuler la variation de son « matin ».

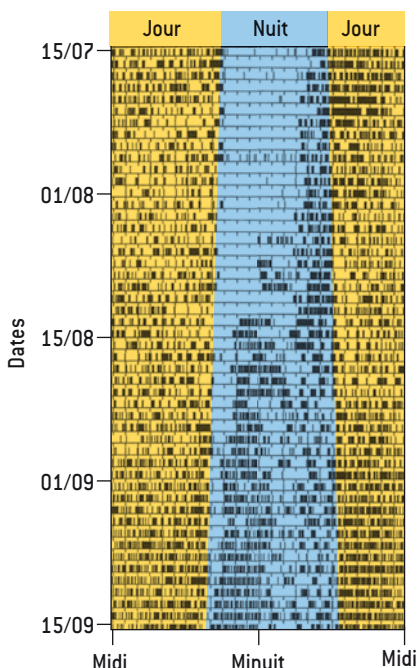
Les oiseaux perçoivent la photopériode grâce à des photorécepteurs situés dans le cerveau, où la lumière parvient à travers les plumes, la peau et le crâne. Même des oiseaux aveugles en sont capables. À la fin de l'hiver, quand les jours s'allongent, les photorécepteurs activent une cascade de modifications hormonales et physiologiques. Les mécanismes qui déclenchent la migration d'automne sont moins bien connus, mais on sait que le raccourcissement des jours est en cause.

Outre la photopériode, certains oiseaux utilisent un « calendrier interne » (une horloge circannuelle). Quand on les soumet à des jours artificiels de durée constante, ils présentent spontanément une activité de *Zugunruhe* deux fois par an. Gwinner a montré que des rythmes circannuels peuvent persister en captivité pendant 12 ans, soit la durée de vie maximale des passereaux captifs. Selon les espèces, ils sont plus ou moins réguliers et influent plus ou moins sur la régulation saisonnière de l'activité. En particulier, ils sont plus importants pour les oiseaux qui passent l'hiver près de l'équateur, où la longueur du jour ne varie pas assez pour déclencher la migration de printemps, ainsi que pour



P. Bartell

2. LE ZUGUNRUHE, caractérisé notamment par des battements d'ailes doublés d'une grande agitation, est visible en infrarouge sur cette image prise dans une complète obscurité. Les oiseaux migrant la nuit adoptent ce comportement, quand ils sont captifs, aux périodes correspondant à leur migration.



Adapté de P. Bartell et E. Gwinner, *Journal of Biological Rhythms*, 20: 358, 2005

3. L'ACTIVITÉ D'UNE FAUVETTE DES JARDINS (*Sylvia borin*) en captivité, indiquée par des barres noires, augmente quand on diminue artificiellement la durée du jour d'une façon caractéristique de la période précédant la migration d'automne. Cette augmentation concerne la période nocturne, tandis que l'activité diurne reste inchangée.

les migrateurs transéquatoriaux, confrontés à une inversion des changements de la photopériode : par exemple, des oiseaux migrant de l'hémisphère Nord vers l'hémisphère Sud à l'automne perçoivent d'abord un raccourcissement des jours, puis un allongement.

Dans la nature, le comportement migratoire résulte donc de facteurs multiples, tels que le rythme circannuel interne, les paramètres génétiques, les signes sociaux, l'état physique et les stimulus environnementaux (photopériode, température, disponibilité de nourriture).

Récemment, Heiko Schmaljohann, de l'Institut de recherche aviaire Vogelwarte Helgoland, en Allemagne, a montré que le traquet motteux (*Oenanthe oenanthe*), un petit migrateur nocturne, parcourt près de 15000 kilomètres lors de ses migrations : il part d'Alaska et rejoint sa zone d'hivernage, en Afrique de l'Est, en passant par la Sibérie, l'Asie centrale et le désert d'Arabie. Comment les oiseaux se repèrent-ils sur une telle distance ? La mise au point de systèmes de localisation très légers permet de suivre leur périple, dont ils révèlent l'itinéraire. Ils indiquent aussi la distance parcourue, la vitesse et le nombre de haltes pour se reposer. Cette technique, encore récente, devrait être d'une grande aide pour étudier la navigation chez les oiseaux migrateurs : mécanismes sensoriels, mémoire spatio-temporelle, adaptations...

S'orienter dans un entonnoir

Avant la mise au point de ces dispositifs, les recherches dans ce domaine se déroulaient en laboratoire, à l'aide d'enceintes nommées entonnoirs d'Emlen, du nom des deux chercheurs qui les ont développées en 1966. Un oiseau est placé dans un dispositif en forme d'entonnoir, dont le fond est constitué d'un tampon encreur et où un tamis fixé sur la partie supérieure empêche le volatile de s'échapper. Les empreintes laissées sur les parois de l'entonnoir indiquent dans quelle direction il tente de s'envoler. Les versions modernes du dispositif utilisent plutôt du papier recouvert d'une mince pellicule blanche (que les oiseaux enlèvent quand ils marchent dessus) ou des techniques électroniques d'enregistrement et d'analyse des données.

On constate ainsi qu'en période de migration, l'oiseau s'oriente dans la direction



Kira Dalmore, Université Columbia

4. DES SYSTÈMES DE GÉOLOCALISATION très légers ont été développés pour étudier les itinéraires, les durées et les sites de halte des migrations. L'un d'eux est ici porté par une grive à dos olive (*Catharus ustulatus*).



P. Bartell

5. QUAND ILS S'APPRÊTENT À MIGRER, les oiseaux accumulent d'importantes quantités de graisse sous-cutanée [en haut et en bas, les états respectifs précédant et suivant l'engraissement].

appropriée : vers le Sud à l'automne et vers le Nord au printemps pour des oiseaux de l'hémisphère Nord. En faisant varier les paramètres de l'expérience (par exemple, en projetant la sphère céleste au plafond ou en créant des champs magnétiques), on détermine quels stimuli servent à l'orientation (voir la figure 6).

On a ainsi montré que les oiseaux de l'hémisphère Nord adoptent la direction à suivre (Nord ou Sud) en se fondant sur les variations saisonnières de la photopériode. Ils s'orientent ensuite grâce à la position des astres, à l'inclinaison du champ magnétique terrestre et à la polarisation de la lumière, qui diffère selon qu'on regarde vers le Soleil ou ailleurs. Cette polarisation leur permettrait de repérer la direction de l'astre quand il vient de disparaître, à la tombée du jour.

L'horloge circadienne pourrait aussi aider à la navigation, mais ce point est controversé. Certains biologistes et physiciens pensent que le cryptochrome, une protéine de l'horloge circadienne, joue un rôle dans la sensibilité des oiseaux au champ magnétique. D'autres chercheurs ont supposé que l'horloge circadienne leur permet de percevoir le décalage horaire, un indicateur de leur position, mais ils n'ont pu le prouver. Des expériences supplémentaires sont nécessaires pour confirmer le rôle de l'horloge circadienne.

Bien plus dur qu'un ultramarathon

La migration des oiseaux ressemble à un sport d'endurance extrême, mais elle dépasse de loin les performances des meilleurs athlètes humains. L'ultramarathon de Badwater, l'une des courses les plus difficiles au monde, part de la Vallée de la Mort, en Californie, et s'étend sur une distance de 217 kilomètres ; c'est bien peu au regard de la migration de la barge rousse (*Limosa lapponica*), qui effectue un voyage de presque 11 000 kilomètres en huit jours ! Notons tout de même que le vol nécessite moins d'énergie par unité de masse que la course. En revanche, il mobilise 70 à 90 pour cent de la capacité aérobie maximale des oiseaux (le volume maximal d'oxygène qu'ils peuvent consommer par unité de temps).

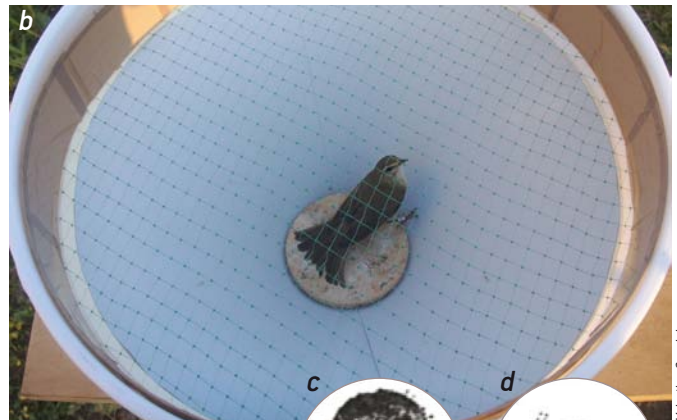
Contrairement aux athlètes humains, les oiseaux n'ont pas accès à des sources externes d'eau ou de nourriture pendant

un exercice intense et prolongé. L'homme en a besoin, car les mammifères puisent d'abord leur énergie dans des hydrates de carbone – les sucres –, dont les réserves s'épuisent vite. Quand elles sont terminées, l'organisme consomme les lipides – les graisses. Or nos mécanismes de combustion des lipides sont peu efficaces, ce qui limite notre endurance, même si nous avons des graisses en excès. À l'inverse, les oiseaux migrateurs utilisent de préférence les graisses comme source d'énergie, et chaque individu en stocke avant son départ.

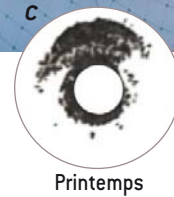
L'endurance est dans la graisse

Ainsi, les oiseaux chanteurs doublent leur masse corporelle pour se préparer à la migration, essentiellement en augmentant les réserves de graisses sous-cutanées. L'engraissement prémigratoire est contrôlé par une horloge interne circannuelle chez de nombreuses espèces. La variation de la photopériode et la disponibilité en nourriture participent aussi à son déclenchement. Chez certaines espèces, des modifications métaboliques entraînent l'accumulation de graisses même sans augmentation de la quantité de nourriture absorbée. Cependant, dans la plupart des cas, les oiseaux mangent bien plus au cours de cette période. Ce comportement est associé à un accroissement saisonnier de la concentration en neurotransmetteurs (des molécules responsables de la communication entre neurones) dans l'hypothalamus, une aire cérébrale profonde qui contrôle l'appétit et la satiété.

Chez les mammifères, la satiété est en grande partie déclenchée par une hormone nommée leptine : synthétisée par les cellules adipeuses constituant la graisse corporelle, elle est d'autant plus abondante que ces cellules sont nombreuses et indique donc l'importance des réserves de graisses. On a voulu savoir si cette hormone intervient dans les modifications saisonnières de la prise de nourriture, du stockage des graisses et de leur utilisation chez les oiseaux migrateurs. Christopher Guglielmo, de l'Université de l'Ontario de l'Ouest, a montré que les oiseaux y sont aussi sensibles : ils ont un récepteur fonctionnel pour cette hormone, et des injections de leptine ont des effets notables sur leur métabolisme. Pourtant, le gène qui code la leptine est absent de leur génome.



6. LES ENTONNOIRS D'EMLÉN servent à déterminer la direction d'envol des oiseaux migrateurs, retenus captifs par un filet. Les empreintes des oiseaux, qui s'impriment sur le papier recouvrant la paroi de l'entonnoir (b), montrent que cette direction diffère entre la migration de printemps (c) et celle d'automne (d). Divers dispositifs permettent d'étudier les indices utilisés par les oiseaux pour s'orienter (a, un bobinage électrique qui crée un champ magnétique artificiel).



Printemps



Automne

Ils utilisent donc probablement un autre signal pour indiquer le niveau des réserves de graisse. L'un des candidats est l'adiponectine, une hormone également produite par les cellules adipeuses. Cette hormone favorise la mobilisation et la transformation du glucose et des acides gras.

Comme beaucoup d'autres facteurs métaboliques, l'adiponectine est produite selon un rythme circadien (voir la figure 7). Des chercheurs de notre laboratoire ont montré que pendant la migration des bruants à gorge blanche (*Zonotrichia albicollis*), le maximum de concentration en adiponectine survient pendant la nuit, tandis qu'il a lieu le jour aux autres périodes. En outre, le nombre de récepteurs de l'adiponectine augmente notablement durant la nuit dans le foie des oiseaux en migration. Ces deux changements favorisent la production d'énergie pour les vols nocturnes.

Le début de la période d'engraissement et sa durée sont liés à la distance de migration : plus cette dernière est longue, plus les oiseaux accumulent de graisses. Comment peuvent-ils alors décoller ? La taille de leurs organes digestifs diminue, compensant en partie le gain de poids associé aux graisses, et la masse musculaire augmente. Néanmoins, avant la migration, l'état physique d'un oiseau diffère de celui d'un athlète humain se préparant à une activité physique intense, pour laquelle un excès de poids n'est pas souhaitable. Chez un humain, l'augmentation de la masse corporelle, de la proportion de graisse et des concentrations de glucose et de lipides dans le sang

La carte et la boussole

Dans les années 1950, l'ornithologue néerlandais Albert Perdeck (1923-2009) a déplacé de plusieurs kilomètres des étourneaux lancés dans leur migration automnale. Ceux qui avaient déjà accompli la migration auparavant ont corrigé leur trajectoire et leur temps de vol, et sont arrivés à leurs quartiers d'hiver habituels. Ceux qui migraient pour la première fois ont continué leur route vers le Sud comme si de rien n'était.

Cette expérience montre, d'une part, que les oiseaux migrateurs ont une capacité déterminée génétiquement à maintenir une direction fixe et, d'autre part, qu'ils établissent une carte mentale de leur environnement au fil des voyages. En d'autres termes, ils utilisent une boussole pour suivre une direction, mais aussi une carte pour déterminer quelle direction suivre afin d'arriver à destination.

Si les mécanismes de boussole sont assez bien connus, ceux qui sous-tendent la carte mentale des oiseaux migrateurs restent à déterminer. Ils ne sont établis que chez le pigeon voyageur (une espèce non migratrice), qui se fonderait sur les odeurs lui parvenant pour construire une carte chimique. Ainsi, un pigeon qui n'est jamais sorti de son pigeonnier le retrouve même si on l'en éloigne de plusieurs dizaines de kilomètres. Pour les oiseaux migrateurs, certains chercheurs pensent qu'ils utilisent les étoiles pour déterminer non seulement la direction, mais aussi leur position ; les astres seraient à la fois la carte et la boussole. Toutefois, ils n'ont pas réussi à le prouver.

Francesco Bonadonna

Responsable de l'équipe Écologie comportementale, CEFE/CNRS (UMR 5175)

seraient même des marques d'obésité et de syndrome métabolique – expression désignant un ensemble de dysfonctionnements métaboliques associés à un risque élevé de diabète et de maladies cardiovasculaires. En d'autres termes, selon les critères humains, les oiseaux en période prémigratoire sont obèses, diabétiques et susceptibles d'être terrassés par une crise cardiaque à tout moment !

Un rendement dix fois supérieur à celui des mammifères

Toutefois, les oiseaux brûlent bien mieux les graisses que les mammifères et sont beaucoup plus résistants aux troubles métaboliques. Les graisses fournissent le plus d'énergie par unité de masse, ce qui en fait un carburant idéal. Cependant, comme elles sont insolubles, elles sont difficiles à transporter des sites de stockage jusqu'aux muscles. Les oiseaux y sont bien adaptés, ce qui leur permet d'utiliser la graisse avec un rendement dix fois supérieur à celui des mammifères, voire plus pendant la migration. Ainsi, la concentration en protéines assurant le transport des lipides augmente durant la migration.

Chez les oiseaux, des horloges circadiennes contrôlent la prise de nourriture et l'utilisation des réserves énergétiques. Ces horloges, qui se réorganisent pendant les migrations nocturnes, interagissent de façon complexe avec les voies métaboliques. Les liens entre le métabolisme des lipides et les

mécanismes moléculaires des horloges font l'objet de nombreuses recherches, en raison de leurs implications dans certains troubles métaboliques humains. Chez l'homme, l'une de ces horloges, située dans le foie, influe sur la transformation des nutriments et sur des paramètres physiologiques tels que la glycémie. Des résultats récents suggèrent que chez les oiseaux, elle joue aussi un rôle important dans la régulation du métabolisme pendant la migration.

L'un de nous (P. Bartell) a ainsi montré que l'horloge circadienne hépatique change notablement chez des fauvettes à tête noire (*Sylvia atricapilla*) manifestant une activité

de *Zugunruhe*. En particulier, la concentration de certaines molécules ne varie plus aux mêmes moments et la quantité de nombreuses protéines d'horloge fluctue entre des maximums plus élevés et des minimums plus faibles. Lors de cette étude, les oiseaux étaient soumis à des durées constantes du jour, ce qui montre que les modifications de l'horloge hépatique sont déclenchées par des signaux circannuels internes. En outre, ils ne mangeaient pas la nuit ; les changements physiologiques ne résultent donc pas de décalages entre les repas, ni de différences entre les nutriments absorbés.

Au cours de la migration, les oiseaux se nourrissent toujours le jour, mais le vol, très consommateur d'énergie, se décale vers la nuit. Il semble que pendant la journée, l'horloge hépatique prépare le corps de l'oiseau au vol nocturne en entraînant la synthèse de protéines nommées PPAR γ , qui favorisent la production et le stockage des graisses (voir l'encadré ci-dessous). Inversement, la nuit, l'horloge hépatique accélère le métabolisme des lipides et donc la production d'énergie pour le vol.

Ces expériences soulignent les relations complexes entre les horloges biologiques internes, le métabolisme des graisses et la

HORLOGES INTERNES ET MÉTABOLISME DES GRAISSES : DE MULTIPLES INTERACTIONS

Dans l'horloge circadienne des vertébrés interviennent quatre protéines principales, nommées CLOCK, BMAL, Period (Per) et cryptochrome (Cry). La concentration de ces protéines fluctue selon un cycle de 24 heures. Les protéines CLOCK et BMAL s'associent pour activer la transcription des gènes *Per* et *Cry*. Des protéines Per et Cry sont alors produites et se lient au complexe CLOCK/BMAL, qu'elles finissent par empêcher de réguler l'expression du génome – et donc de déclencher leur propre production. Il en résulte une diminution des quantités de protéines Per et Cry, régulièrement dégradées dans la cellule et non renouvelées. Quand elles sont devenues assez rares, le complexe CLOCK/BMAL active de nouveau la transcription des gènes *Per* et *Cry* et le cycle recommence.

Cette boucle de régulation moléculaire existe à divers endroits de l'organisme, où des groupes de cellules se coordonnent parfois pour remplir des fonctions d'horloge. Dans le cerveau, par exemple, une « horloge maîtresse » coordonne les horloges dites périphériques, telle celle localisée dans le foie, qui contrôle le métabolisme des nutriments et l'homéostasie énergétique (l'équilibre entre les apports et les dépenses d'énergie).

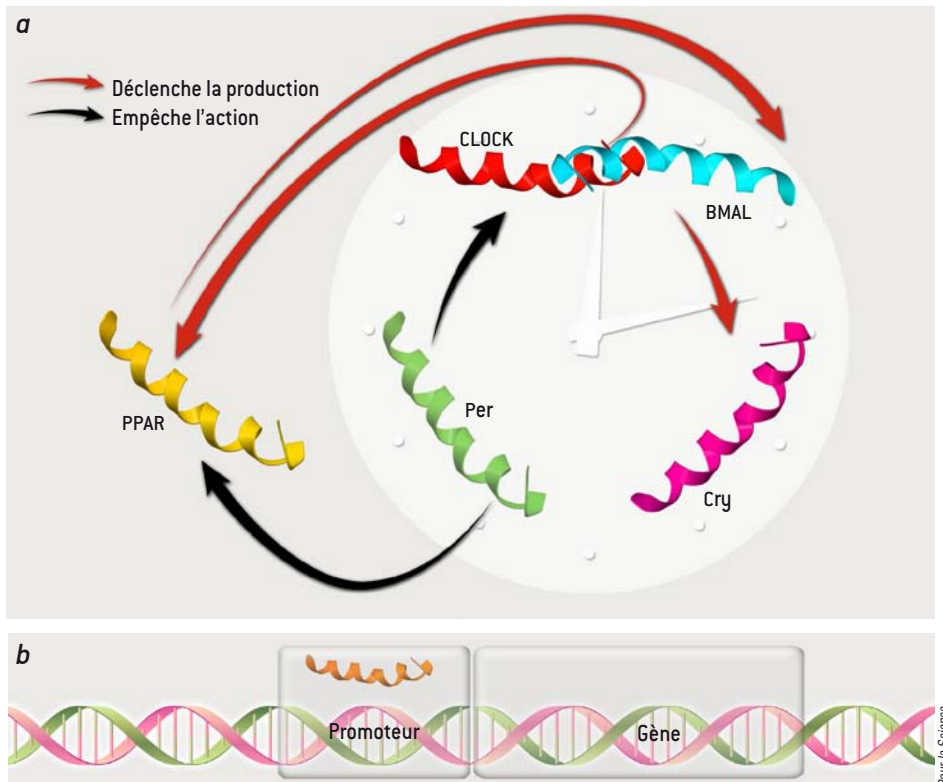
Outre *Per* et *Cry*, le complexe CLOCK/BMAL active la transcription périodique de nombreux autres gènes. L'un d'eux est celui de la protéine PPAR, qui régule à son tour la transcription d'autres gènes. Diffé-

rentes formes de PPAR assurent des fonctions distinctes. Le PPAR α , surtout présent dans le foie, favorise la dégradation des lipides. Le PPAR γ , à l'inverse, entraîne la production et le stockage de graisses. Les comportements alimentaires suivant un rythme d'environ 24 heures chez

nombre d'animaux, c'est peut-être aussi le cas de la concentration de ces composés.

Ce n'est pas la seule interaction des protéines PPAR et de l'horloge hépatique. La protéine Per limite la production de graisses en inhibant la régulation de la transcription ef-

fectuée par PPAR ; la production de Per étant périodique, il en serait de même de l'activité de PPAR. Enfin, les protéines PPAR activent l'expression du gène codant la protéine d'horloge BMAL. Ainsi, elles contrôlent l'horloge moléculaire, et sont contrôlées par elle en retour.

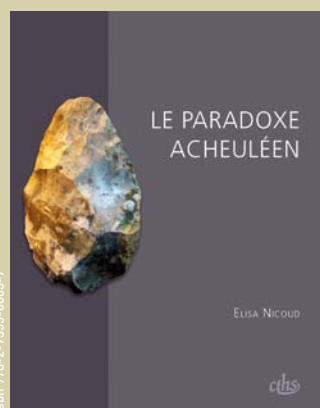


LES HORLOGES CIRCAIDIENNES DES VERTÉBRÉS sont notamment fondées sur les fluctuations périodiques des concentrations de quatre protéines [CLOCK, BMAL, Per et Cry], qui s'influencent mutuellement (a). Elles interagissent avec le métabolisme des graisses, en contrôlant la production de protéines PPAR – qui rétroagissent sur la production de protéines d'horloge – ou en inhibant leur action sur l'expression du génome. Pour déclencher l'expression d'un gène (et la production des protéines qu'il code), les protéines se fixent sur ses promoteurs, des segments d'ADN qui le précèdent (b).

Éditions du Comité des travaux historiques et scientifiques

la plus importante collection d'instruments de travail pour la recherche en sciences humaines

Collection documents préhistoriques



isbn 978-2-7355-0803-7

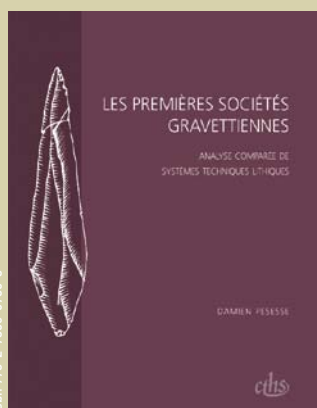
Le Paradoxe acheuléen

Élisabeth Nicoud

Les vestiges acheuléens se caractérisent par la présence d'un objet d'une même famille typologique : morphologie générale en amande, extrémité mince aux bords convergents et l'autre épaisse, deux faces taillées selon deux plans de symétrie (bifaciale et bilatérale) approximatifs. Le biface est un objet intrigant élevé au rang de « fossile directeur » d'une culture de la préhistoire, derrière lequel plusieurs éléments variés se regroupent pourtant. Nous verrons alors que ce terme générique recouvre des industries distinctes et révèle l'existence de nouvelles dynamiques de peuplement européen au Pléistocène moyen.

Coéditeur : École française de Rome

309 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €



isbn 978-2-7355-0784-3

Les Premières sociétés gravettiennes

Analyse comparée de systèmes techniques lithiques

Damien Pesesse

L'étude des premières sociétés gravettiennes fournit un éclairage original sur les processus culturels affectant ces populations entre 31 000 et 27 000 BP. La comparaison des séries lithiques de La Gravette, Puy Jarrige et La Vigne Brun met en évidence une tradition technique cohérente qui définit la première composante gravettienne en France et dans certains pays limitrophes.

Le développement de ces pratiques et les modifications du système technique lithique à la fin de l'Aurignacien sont mis en évidence dans le gisement de l'abri Pataud.

288 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €



isbn 978-2-7355-0731-3

Le lapis lazuli dans l'Orient ancien

Production et circulation du Néolithique au II^e millénaire av. J.-C.

Michèle Casanova

Le lapis-lazuli occupe une place de tout premier plan dans les sociétés du Proche-Orient ancien. Son histoire, entamée au Néolithique avec les parures découvertes au VII^e millénaire à Mehrgarh, se prolonge jusqu'au II^e millénaire avant J.C. et même au-delà. Par l'examen détaillé de sa présence, par la typologie des objets, la caractérisation des outillages et des savoir-faire, par les questions de dimension anthropologique qui se cristallisent sur les emplois et les fonctions des objets en lapis-lazuli, ces questions peuvent éclairer la connaissance du mouvement historique d'ensemble de l'humanité.

284 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €



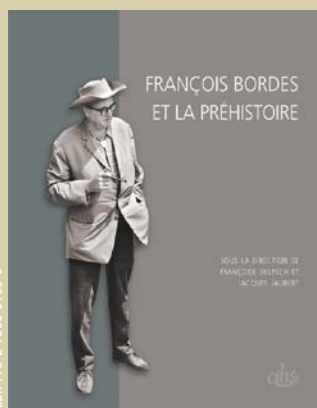
isbn 978-2-7355-0761-1

Peuplements et préhistoire en Amériques

Denis Vialou (dir.)

Cet ouvrage réunit les contributions de soixante préhistoriens de neuf pays, impliqués dans des recherches sur le terrain, de l'extrême nord du continent jusqu'à sa pointe australe. Plusieurs grandes problématiques y sont analysées : les peuplements, les cultures paléindiennes en Amérique du Nord, les chasseurs-cueilleurs, les horticulteurs ou encore les peuples pêcheurs en Amérique du Sud, la technologie d'industries lithiques... Profondément diverse et originale, la préhistoire en Amériques révèle des comportements sociaux et économiques en union remarquable avec les milieux naturels variés de l'immense continent. Elle témoigne de la créativité novatrice et résolument moderne des Sapiens préhistoriques.

492 p., ill., 21 x 27 cm, 52 €



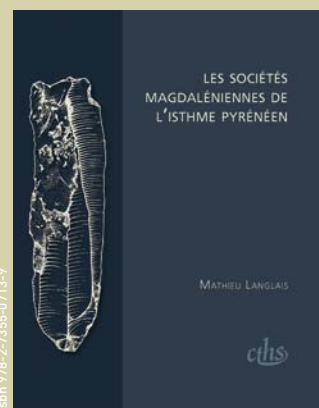
isbn 978-2-7355-0766-5

François Bordes et la préhistoire

Françoise Delpéch et Jacques Jaubert (dir.)

Excepté quelques publications individuelles ou les journées hommages de la Société préhistorique française (1982) demeurées inédites, c'est le premier ouvrage exclusivement consacré à l'œuvre du préhistorien François Bordes (1919-1981). Incontestablement, avec André Leroi-Gourhan, il est l'un des deux grands noms de la discipline pour la seconde moitié du XX^e siècle en France : géologue, préhistorien, auteur de nombreuses fouilles sur des sites prestigieux du Sud-Ouest, initiateur de la taille expérimentale et à l'origine de travaux précurseurs et fondamentaux, notamment du point de vue méthodologique.

328 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €



isbn 978-2-7355-0713-9

Les sociétés magdaléniennes de l'isthme pyrénéen

Mathieu Langlais

Les sociétés de chasseurs-cueilleurs du magdalénien, qui ont perduré pendant sept millénaires entre Méditerranée et Atlantique, sont appréhendées ici à travers leurs équipements lithiques. Cet angle d'approche nous révèle que la confrontation de l'armement et de l'outillage en silex s'avère un levier dialectique efficace pour enquêter sur les moteurs évolutifs et sur les interactions entre les transformations socio-économiques et les changements environnementaux au cours de la fin du Dernier Maximum Glaciaire et du Tardiglaciaire.

340 p., ill., 21 x 27 cm, 45 €