

pages d'une catégorie sont plus souvent liées entre elles qu'à celles de l'autre communauté.

Plus généralement, *Clever* révèle la structure sous-jacente du réseau. Bien que ce dernier ait crû de façon fulgurante et anarchique, il possède une structure intrinsèque – bien qu'imparfaite – fondée sur les liaisons entre pages.

Le lien avec l'analyse de citations

Par son principe, *Clever* ressemble à l'analyse de citations, l'étude de la manière dont les articles scientifiques se citent : la principale mesure de l'importance des articles est le «facteur d'impact», qui juge les publications d'après le nombre de références que les autres articles en font. Mis au point par Eugene Garfield, un spécialiste de l'information scientifique, le facteur d'impact préside à l'«Index des citations scientifiques» (*Science Citation Index*).

Sur le réseau, le facteur d'impact d'une page pourrait être le nombre de liens qui pointent vers elle. Toutefois, cette approche simpliste favoriserait, même pour des requêtes sur des sujets spécifiques, les pages généralistes très connues, telle la page d'accueil du *Monde*.

Dans le domaine de l'analyse des citations, les chercheurs ont tenté d'améliorer la mesure de E. Garfield, qui compte de la même façon toutes les références. Ne serait-on pas avisé de donner plus de poids aux citations d'un journal plus important? Le problème, avec cette approche, est qu'on donne une définition circulaire du mot «importance», comme dans la définition des pivots et des références.

Dès 1976, Gabriel Pinsky et Francis Narin, du Laboratoire de recherches du CHI, dans le New Jersey, ont éliminé cet obstacle en mettant au point une méthode itérative de calcul qui aboutit à un ensemble stable de notes, qu'ils nomment poids d'influence. Toutefois, ils ne distinguent pas référence et pivot.

Cette différence révèle une particularité entre les pages Internet et la littérature scientifique classique : dans le cyberspace, des sites de référence en compétition, comme *Netscape* et *Microsoft*, ne reconnaissent pas leur existence mutuelle et ne peuvent donc être reliés que par un ensemble de pivots tiers ; inversement, les revues scientifiques rivaux pratiquent des

citations croisées qui rendent le rôle des pivots moins crucial.

D'autres équipes utilisent différemment les hyperliens, pour la recherche sur le réseau. À l'Université de Stanford, Serge Brin et Larry Page ont mis au point un moteur de recherche, nommé *Google*, qui utilise un classement fondé sur les poids d'influence de G. Pinsky et F. Narin. L'équipe de Stanford considère un internaute qui suit des liens en faisant un certain nombre de sauts au hasard, qui le mènent à certaines pages plus fréquemment qu'à d'autres. Ainsi *Google* trouve un seul type de pages universellement importantes, intuitivement celles qui sont fréquemment visitées lors d'une marche au hasard dans la structure des liens du réseau. Concrètement, pour chaque page, *Google* additionne les notes des sites qui pointent vers la page. C'est pourquoi, lors d'une requête spécifique, *Google* répond rapidement en trouvant toutes les pages qui contiennent le texte recherché et en les ordonnant selon leur rang prédéterminé.

Les moteurs *Google* et *Clever* diffèrent cependant par deux aspects importants. D'une part, *Google* élabore un ordre de classement initial et l'utilise quelle que soit la requête, alors que *Clever* construit un ensemble de base différent pour chaque terme recherché, puis fixe les priorités des pages dans le contexte de cette requête. Au total, *Google* répond plus rapidement. D'autre part, *Google* ne regarde que dans une seule direction, d'un lien vers un autre, alors que *Clever* regarde aussi dans l'autre direction, pour savoir quels sont les sites qui pointent vers une page de référence. *Clever* tire ainsi parti du phénomène sociologique qui fait que les humains construisent naturellement des contenus qui expriment leur expertise sur un sujet donné.

La recherche continue

Nous cherchons encore à améliorer *Clever*. Dans notre démarche, nous cherchons à associer texte et hyperliens. Pour ce faire, nous estimons que certains liens ont plus de poids que d'autres suivant la pertinence du texte qui se trouve en regard. Plus précisément, nous analysons le contenu des pages dans l'ensemble de base et nous cherchons le nombre d'occurrences et les positions relatives du terme recherché. Ces informations pondèrent ensuite certaines connexions entre

pages. Si, par exemple, le texte de la requête apparaît fréquemment à proximité d'un lien, alors la pondération correspondante est augmentée.

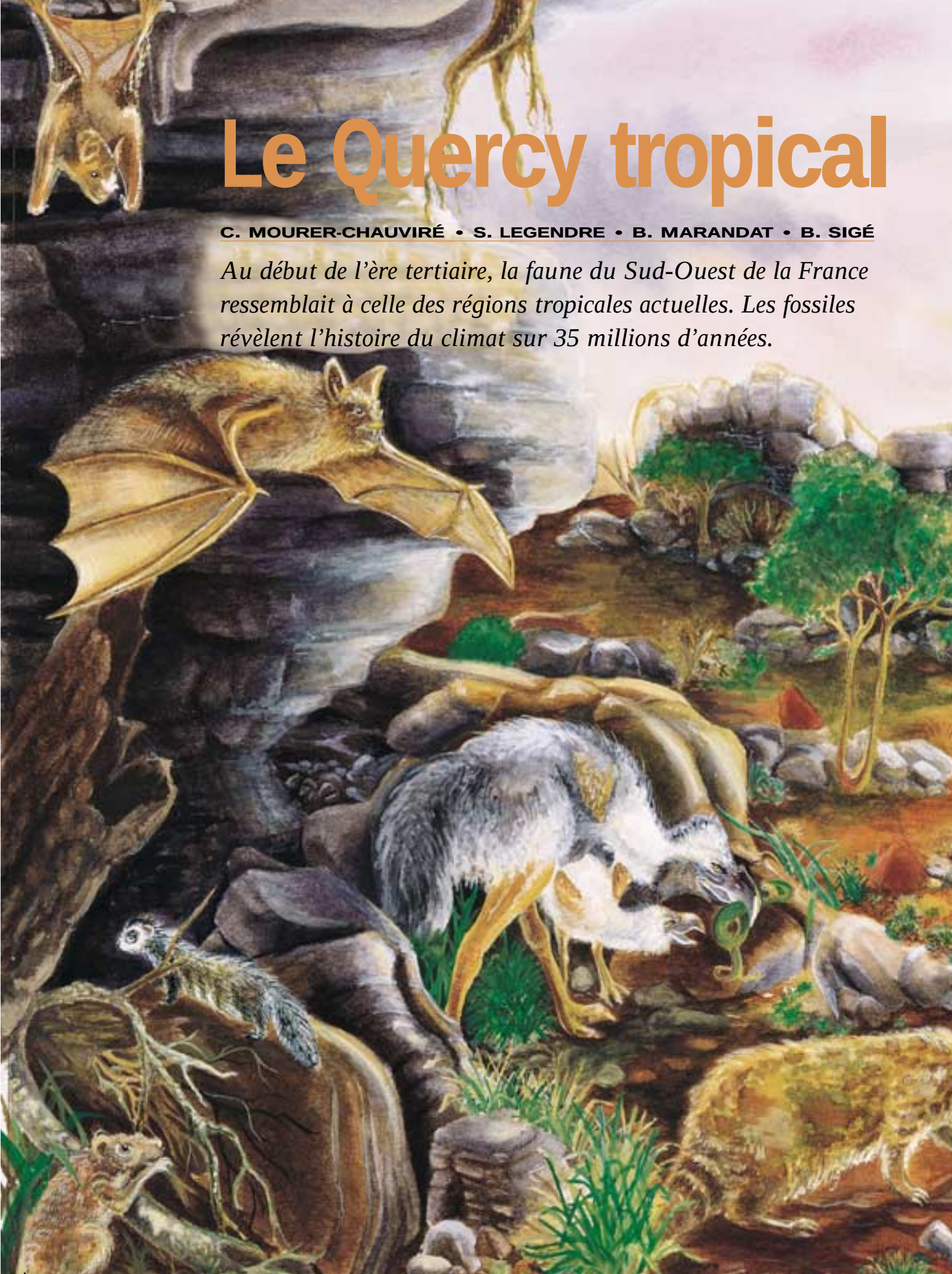
Nos premières expériences indiquent que ce raffinement améliore substantiellement la pertinence des résultats (une imperfection de *Clever* a parfois l'inconvénient d'élargir trop sa recherche, quand la requête est très précise : ainsi, si l'on cherche la Maison Ozenfant, de Le Corbusier, le système élargit sa recherche et retrouve des informations sur un sujet général comme l'architecture contemporaine). Nous expérimentons d'autres améliorations qui tiennent compte des divers styles de réalisation de pages Internet.

Nous avons aussi commencé à construire automatiquement des listes de ressources Internet, similaires aux annuaires de sites élaborés manuellement par les employés de sociétés comme *Yahoo!* ou *Infoseek*. Les premiers résultats sont aussi bons que ceux des annuaires. De surcroît, ce travail nous a montré que le réseau est plein de petites communautés très liées, avec des intérêts particuliers (les amateurs de sumo, les passionnés de yo-yo de la Creuse ou les amateurs de sauce ketchup au petit déjeuner). Nous recherchons comment découvrir automatiquement ces communautés cachées (voir la figure 1).

Le réseau Internet est aujourd'hui très différent de ce qu'il était il y a seulement cinq ans. Personne ne peut dire ce qu'il sera dans cinq ans. L'indexation du réseau deviendra-t-elle impossible? Et comment la notion de recherche changera-t-elle alors? Aujourd'hui, la seule chose dont nous soyons certains est que la croissance du réseau continuera à lancer des défis informatiques à ceux qui veulent naviguer dans cet océan d'informations.

Le projet *Clever* : Soumen Chakrabarti, Byron Dom, Ravi Kumar, Prabhakar Raghavan, Sridhar Rajgopalan et Andrew Tomkins travaillent au Centre de recherche Almaden d'IBM, à San Jose (Californie). Jon Kleinberg travaille au département d'informatique de l'Université Cornell. David Gibson termine sa thèse au département d'informatique de l'Université de Berkeley.

De nombreux liens pour cet article sont disponibles sur notre site Web : <http://www.pourlascience.com/numeros/pls-262/clever.htm>



Le Quercy tropical

C. MOURER-CHAUVIRÉ • S. LEGENDRE • B. MARANDAT • B. SIGÉ

Au début de l'ère tertiaire, la faune du Sud-Ouest de la France ressemblait à celle des régions tropicales actuelles. Les fossiles révèlent l'histoire du climat sur 35 millions d'années.



Laurence MESLIN



1. CE PAYSAGE TROPICAL aurait pu être observé près du site d'Itardiès, dans le Tarn-et-Garonne, il y a 30 millions d'années. Le Soleil se couche. Nous sommes placés sous un porche rocheux, à l'entrée d'une grotte creusée dans le calcaire. Sur le plateau, le sol est partiellement couvert d'une argile rougeâtre formée par la dissolution et l'altération chimique de la roche calcaire. La végétation clairsemée, herbacée en touffes et faiblement arborée correspond à un climat assez chaud et aride. Les animaux qui peuplent ce paysage sont très différents de ceux que l'on trouve aujourd'hui dans la région, en particulier les oiseaux, dont les formes apparentées actuelles vivent surtout sous les tropiques. Au premier plan figurent, de gauche à droite : (1) *Issiodoromys medius*, rongeur de la famille des thériidomyidés, représentant un grand groupe endémique et éteint du Paléogène d'Europe (il y a 65 à 23 millions d'années) ; (2) deux chauves-souris à feuillets nasaux, d'un genre éteint de la famille des hipposidéridés, *Palaeophyllophora quercyi* ; (3) une civette de moyenne taille, *Stenoplesictis minor* (famille des viverridés) ; (4) *Palaeotodus itardiensis*, todier de la famille des todidés ; (5) *Caenomeryx cf. procommunis*, petit herbivore artiodactyle de la taille d'un lapin, de la famille éteinte des cainothériidés. Au deuxième plan : (6) un grand oiseau carnivore, la mère et son petit, *Ameghinornis minor* (famille des phororhacidés) ; (7) *Stenogale gracilis*, petit carnivore du groupe des putois (famille des mustélidés) ; (8) *Idiornis itardiensis*, échassier voisin des cariamidés. Plus en arrière : (9) une famille de grands rhinocéros primitifs, *Ronzotherium sp.* (famille des rhinocerotidés) ; (10) *Nimravus intermedius*, grand carnivore félin à dents de sabre. Perché sur l'arbre, (11) un rolrier, *Geranopterus alatus* (famille des coraciidés).



2. UN CRÂNE ET UNE MANDIBULE d'un mammifère artiodactyle ruminant (le groupe qui renferme les vaches, les chameaux et les girafes) d'une quinzaine de kilogrammes, *Diplobune minor*, retrouvés dans la position même où ils étaient lorsque l'animal est mort, il y a 30 millions d'années. Le site d'Itardiès, d'où ils proviennent, a aussi livré des pattes du même animal en connexion anatomique. Leur analyse révèle que cette espèce était adaptée au déplacement sur des terrains boueux instables : l'environnement était sans doute marécageux. La qualité de préservation des fossiles du Quercy apporte ainsi de précieuses informations sur les parentés entre les espèces, mais aussi sur les évolutions de l'environnement pendant 35 millions d'années.

L'origine des chauves-souris

Dans l'ordre des chauves-souris, les Chiroptères, les fossiles du Quercy révèlent la diversification précoce, dès l'Éocène moyen (il y a 44 millions d'années), c'est-à-dire peu après son apparition, du genre *Stehlinia*, forme primitive de la superfamille des vespertilionoïdés, très répandue et très diversifiée dans la nature actuelle (et comprenant, entre autres, les chauves-souris que l'on rencontre aujourd'hui en France, tels les murins, les sérotines et les pipistrelles).

Le genre *Stehlinia* a été décrit en 1919 d'après un unique spécimen, un petit crâne (non daté) des anciennes collections des phosphorites du Quercy. Grâce aux fouilles modernes, des spécimens de ce genre ont été retrouvés, parfois assez complets, et datés avec précision. Un inventaire, établi en 1987, montre la coexistence de plusieurs lignées de *Stehlinia*, dans différentes catégories de taille, de l'Éocène supérieur à l'Oligocène supérieur (il y a entre 38 et 23 millions d'années).

Des *Stehlinia* plus anciens, de l'Éocène moyen (il y a 50 à 38 millions d'années), avaient été reconnus dans quelques faunes karstiques ou dans des dépôts lacustres d'Europe occidentale (en France, en Suisse et en Allemagne). En général, il s'agissait de dents isolées ou de rangées dentaires partielles, dont l'attribution à une espèce plutôt qu'à une autre était impossible. Seule la cavité de Cuzal, découverte récemment dans le Quercy, a livré des restes plus complets, qui ont permis à l'un d'entre nous (B. Sigé) et à Gerhard Storch de démontrer la coexistence de trois lignées dès l'Éocène moyen en Europe, qui perdurent entre 44 et 41 millions d'années.

Cette diversité, quasi contemporaine de la plus ancienne trace de *Stehlinia*, atteste la diversification adaptative précoce de ce genre en différentes catégories de taille. Cette diversification a-t-elle suivi de peu l'émergence en Europe du type morphologique *Stehlinia* à partir d'une forme plus primitive, ou est-elle consécutive à l'arrivée en Europe d'une forme plus ancienne apparue sur un autre continent ? Quelques éléments autorisent cette dernière hypothèse, notamment la présence en Tunisie de chiroptères anciens, de l'Éocène inférieur, ce qui montre la précocité de l'ensemble vespertilionoïde dans cette aire géographique.

Le Soleil disparaîtra bientôt à l'horizon. Dans la savane, des rhinocéros paissent paisiblement, tandis qu'un félin à dents de sabre guette ses proies, petits herbivores et rongeurs. D'étranges oiseaux carnivores, au bec puissant et acéré, dévorent serpents et lézards. Des bosquets d'arbres abritent de nombreux autres oiseaux, échassiers, todiers ou rolliers. Dans des anfractuosités rocheuses nichent des chauves-souris.

Ce paysage n'est ni africain, ni Sud-américain, ni Sud-asiatique : nous aurions pu le contempler, avec les animaux qui le peuplaient, il y a 30 millions d'années, dans les environs d'Itardès, aujourd'hui dans le Tarn-et-Garonne. De cette faune, il ne subsiste que des fossiles. Toutefois, malgré leur ancienneté, leur abondance et leur bon état de conservation nous permettent de décrire les espèces presque aussi bien que celles qui peuplent les savanes tropicales actuelles : nous avons retrouvé

de nombreux crânes de mammifères, des squelettes en connexion anatomique (dont les os n'avaient pas bougé depuis la mort de l'animal) et des restes d'espèces forestières qui se fossilisent rarement.

Nous connaissons aujourd'hui, dans le Quercy, 150 gisements fossilières analogues. Ils forment l'un des ensembles les plus riches au monde et donnent, à eux seuls, une image quasi complète de la faune des vertébrés d'Europe occidentale au début de l'ère tertiaire, de l'Éocène au début du Miocène (il y a entre 55 et 20 millions d'années). Les fossiles retracent l'évolution des espèces disparues et leurs liens de parenté sur plusieurs millions d'années.

Les méthodes d'étude sont proches de celles qu'utilisent les biologistes pour l'étude des faunes actuelles. Nous reconstituons ainsi l'histoire des différents groupes et nous affinons l'échelle de datation relative fondée sur les faunes européennes de cette période. En outre, la connaissance approfondie des faunes, en particulier des mammifères, nous a permis de mettre au point de nouvelles méthodes paléontologiques, pour la datation absolue des gisements et pour la reconstitution du climat et de l'environnement.

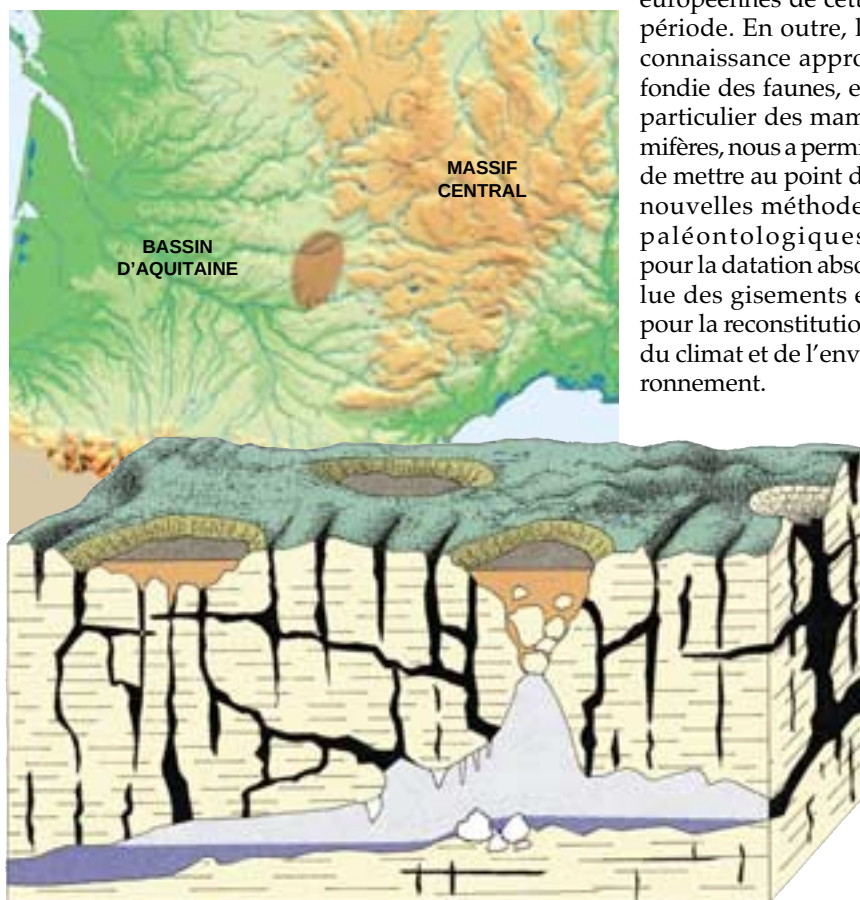
Un ancien fond marin

Adossé aux contreforts Sud-Ouest du Massif central, le Quercy, dont le nom vient d'une ancienne province française, forme la bordure Nord-Est du bassin d'Aquitaine. À l'Est, cette région est formée de causses, plateaux calcaires, à sol peu profond, dont l'altitude moyenne est d'environ 300 mètres.

Ces plateaux se sont formés pendant le Jurassique, il y a entre 190 et 140 millions d'années. Le Sud-Ouest du Massif central était alors recouvert par une mer peu profonde, située en bordure d'un immense océan, la Téthys, qui séparait le bloc formé par l'Eurasie et l'Amérique du Nord, alors reliées, de celui formé par les continents du Sud (Amérique du Sud, Afrique, Australie et Antarctique). Au fond de cette mer, des sédiments carbonatés, surtout des coquilles de minuscules organismes marins et des boues calcaires, se sont déposés sur une épaisseur totale de plusieurs centaines de mètres. À plusieurs reprises, le niveau marin a baissé et les plates-formes calcaires, émergées, ont été soumises à l'érosion.

La dernière de ces phases d'érosion, après le retrait définitif de la mer, il y a 70 millions d'années environ, a été très intense : les circulations d'eaux souterraines ont ouvert de longues et vastes galeries à l'intérieur du calcaire, donnant naissance à un relief karstique. Après avoir servi à l'évacuation des produits d'érosion, ces galeries et ces puits ont été remplis par des matériaux provenant de l'altération des produits d'érosion des massifs voisins et des résidus de dissolution des roches carbonatées : surtout des argiles et des sables rouges, mais aussi des concrétions de fer (nommées pisolithes) et des concrétions de phosphate tricalcique (nommées phosphorites). De nombreux ossements d'animaux ont aussi été entraînés parmi ces sédiments.

Ce remplissage des réseaux souterrains s'est poursuivi jusqu'à il y a 20 millions d'années. Il a été interrompu à plusieurs reprises par des réactivations de l'érosion karstique, liées à la baisse des niveaux de base des réseaux hydrographiques souterrains, et certaines cavités ont même été déblayées partiellement. Ensuite, à la fin de l'Oligocène et au début du Miocène, il y a 23 millions d'années, de grands lacs d'eau douce confinés auparavant au Sud-Ouest du Quercy



3. LES CAUSSES CALCAIRES DU QUERCY, sur la bordure Sud-Ouest du Massif central (zone en rouge sur la carte), sont érodés physiquement et chimiquement par l'écoulement de l'eau, qui y creuse des fissures, des puits et des galeries, verticaux ou quasi horizontaux (en bas). Ce réseau débouche, en profondeur, dans des cavités vastes et hautes, partiellement noyées, (en bleu) et dont le niveau de remplissage contrôle le régime des écoulements. Les dépressions de surface, reliées à ce réseau, retiennent les sédiments (couleur brique) et se remplissent : c'est là que se sont déposés de nombreux fossiles au début de l'ère tertiaire, il y a entre 55 et 20 millions d'années.



4. CETTE GRENOUILLE MOMIFIÉE par le phosphate de calcium témoigne de l'exceptionnel état de conservation des fossiles du Quercy. Ce spécimen de six centimètres de long, conservé au Muséum national d'histoire naturelle, provient malheureusement de fouilles anciennes, et son origine exacte n'est pas connue. Paradoxalement, son positionnement précis dans une lignée évolutive est difficile : on ne voit pas ses os, qui servent aux comparaisons.

se sont étendus vers l'Est et ont recouvert la plus grande partie des causses quercinois méridionaux. Au fond de ces lacs, une nouvelle couche de sédiments carbonatés s'est déposée, scellant le karst et ses cavités fossilifères.

Puis, il y a trois millions d'années, un mouvement tectonique régulier a soulevé le Sud-Ouest de la France par rapport au niveau de la mer : les causses du Quercy, à nouveau émergés, sont depuis soumis à l'érosion, qui a décapé les calcaires miocènes et jurassiques et a tronqué la partie supérieure des remplissages karstiques... juste à temps pour que l'homme en exploite le contenu !

Du phosphate aux fossiles

Du fer a été extrait de quelques amas de pisolithes, probablement depuis le Moyen Âge, mais l'exploitation des cavités ne commença vraiment qu'en 1870, avec l'extraction du phosphate : en une trentaine d'années, des centaines de poches d'argile phosphatée du plateau du Quercy furent vidées. Le phosphate, séparé de l'argile, était ensuite broyé et calciné, pour être utilisé comme engrais. Simultanément, on exhuma une énorme quantité de restes d'animaux fossilisés et minéralisés dans ces remplissages argileux.

Les fossiles sauvés du broyage industriel alimentèrent un trafic, la plupart des ouvriers carriers les vendant à des collectionneurs, ou à des collecteurs qui agissaient pour le compte de savants ou

d'institutions ; les plus anciens travaux sur ces fossiles datent du début des années 1870. Pendant un siècle, de nombreux auteurs, français et européens, étudièrent ces riches récoltes et firent progresser la connaissance anatomique et systématique de nombreux groupes animaux, surtout des carnivores et des primates, mais aussi des insectivores, des chiroptères (ordre des chauves-souris), des rongeurs, des ongulés, des oiseaux, des reptiles et des insectes.

Les fossiles du Quercy sont remarquablement préservés. Généralement bien minéralisés, non déformés, ils ont conservé les détails de leur structure originelle. Certains animaux ont été minéralisés au tout début de leur décomposition. Ainsi une grenouille a-t-elle été transformée en une statuette de phosphate (voir la figure 4) ! Le plus souvent, il ne reste toutefois que les parties dures (carapaces des arthropodes, coquilles des gastéropodes, restes squelettiques dissociés de vertébrés), mais, même dans ce cas, on a parfois la chance de découvrir des squelettes en connexion, ce qui permet une compréhension plus globale des organismes, de leurs aptitudes fonctionnelles et de leurs modes de vie.

Un bestiaire complet

Les invertébrés trouvés dans les gisements du Quercy sont des gastéropodes terrestres et des arthropodes : des insectes, surtout diptères (mouches)

représentés par leurs pupes (stade de repos correspondant au moment où la larve se transforme en adulte), ainsi que des isopodes, petits crustacés cavernicoles. Les vertébrés sont les plus nombreux.

Les amphibiens, les lézards et les serpents sont nombreux et diversifiés ; les tortues sont plus rares, mais parfois complètes, comme dans la cavité du Garouillas ; les restes de crocodiliens sont exceptionnels. Les oiseaux sont aussi bien représentés, mais moins que les mammifères, dont un catalogue, portant sur les collections antérieures à 1972 recense 12 ordres, 59 familles, 150 genres, 326 espèces et variétés nommées. Les récoltes récentes et leur analyse ont porté ces nombres à 159 pour les genres et à 420 pour les espèces.

Par ailleurs, certaines cavités contiennent jusqu'à 50 espèces de mammifères, dont certaines sont représentées par plusieurs centaines, voire plusieurs milliers, de spécimens. Nous disposons ainsi, pour différentes époques de l'Éocène et de l'Oligocène, d'un catalogue assez complet de la faune terrestre d'Europe occidentale. Par exemple, dans les remplissages de la transition entre l'Oligocène inférieur et l'Oligocène supérieur, il y a environ 30 millions d'années, l'ordre des Chiroptères est représenté par cinq familles, huit genres et 14 espèces, qui forment probablement une part importante de la faune réelle de la période considérée : sa diversité est proche de celle de la faune actuelle des chauves-souris d'Europe, dont la composition est très différente, et qui contient quatre familles, 11 genres, et 29 espèces.

Grâce au grand nombre de spécimens d'une même espèce, nous mesurons la variabilité interindividuelle de différentes parties du squelette. Nous distinguons mieux les phénomènes liés à l'évolution, et nos reconstitutions phylogénétiques sont plus précises.

Aussi grand qu'ait été leur apport à ces études phylogéniques, l'intérêt des collections anciennes est limité. Nous ne savons pas, ou pas assez précisément, d'où a été extrait chaque fossile, les carriers et les revendeurs les ayant mélangés et souvent vendus par lots : l'ensemble donne une image très hétérogène de la faune, des formes primitives côtoyant des formes évoluées plus tardives, chez les gastéropodes et les mammifères par exemple.

Des oiseaux tropicaux et voyageurs

Gâce aux fossiles du Quercy, nous suivons l'évolution des oiseaux d'Europe occidentale pendant plus de 15 millions d'années. Nous ne retrouvons que des formes de taille moyenne ou petite, voire très petite : les très grandes espèces, s'il en existait, n'ont pas été entraînées par l'eau dans les cavités. En revanche, de nombreuses formes forestières, qui se fossilisent rarement, sont présentes. Ces oiseaux sont différents des oiseaux modernes : les Passeriformes, les plus courants aujourd'hui, des corbeaux aux moineaux, sont quasi absents (on n'en connaît avec certitude qu'un seul os). Ils se seraient diversifiés dans l'hémisphère Sud et ne se seraient installés dans l'hémisphère Nord qu'à partir du début du Miocène, il y a 23 millions d'années. Toutes les niches écologiques qu'ils occupent aujourd'hui étaient peuplées par une très grande variété de petits oiseaux, dont beaucoup appartiennent à des groupes qui existent encore aujourd'hui, mais qui ne sont représentés, pour la plupart, que par des formes reliques, cantonnées à quelques zones du globe, surtout dans des régions tropicales, à l'abri de la concurrence avec des groupes d'apparition plus récente (*voir ci-dessous ; on a indiqué en gras les groupes présents dans le Quercy au Tertiaire*).

Les groupes encore présents en Europe ont beaucoup changé depuis l'époque où les cavités karstiques du Quercy se sont remplies, notamment dans l'importance relative des différentes familles d'un même ordre. Ainsi, les Strigiformes (les chouettes et les hiboux) ne comptent aujourd'hui que deux familles : les Tytonidés, ou effraies, qui ne sont représentés que par deux genres, et les Stri-

gidés, très diversifiés, qui incluent tous les autres genres de chouettes et de hiboux. En revanche, dans le Quercy, les Strigidés sont absents : les nombreux Strigiformes appartiennent à deux familles éteintes et aux Tytonidés (avec au moins trois sous-familles, toutes éteintes). Les Strigidés n'apparaissent qu'à partir du Miocène inférieur, il y a entre 23 et 16 millions d'années, et supplantent progressivement les Tytonidés, dans la plupart des milieux terrestres, y compris dans les régions arctiques : les Tytonidés actuels vivent surtout dans les régions tropicales ou tempérées et ne supportent pas les climats froids.

Nous précisons aussi l'origine géographique de certains groupes. Ainsi, les Galliformes, l'ordre des poules, des paons et des pintades, seraient apparus dans l'hémisphère Nord. Les deux familles de Galliformes les plus primitives actuelles, les Megapodiidés et les Craciidés, vivent surtout dans l'hémisphère Sud, en Australie et dans les régions avoisinantes pour les premiers, en Amérique centrale et en Amérique du Sud pour les seconds. Nous avons retrouvé dans le Quercy deux familles de Galliformes encore plus primitives, les Paraortytidés et les Quercymegapodiidés, qui ont vécu dans l'hémisphère Nord jusqu'à l'Oligocène supérieur pour les premiers, et jusqu'au Miocène inférieur pour les seconds. La troisième famille de Galliformes actuels, les Phasianidés (paons, faisans perdrix, dindons, pintades), qui ont probablement évolué en Asie du Sud-Est, n'apparaissent dans le Quercy, comme dans d'autres régions d'Europe occidentale, que vers la fin de l'Oligocène inférieur. À partir de cette époque ils se diversifient et supplantent les autres familles.

Cathartidés (genres *Plesiocathartes* et *Diatropornis*) : les plus anciens représentants de la famille des Vautours du Nouveau Monde (condors, urubus). Aujourd'hui : dans les régions tropicales des deux Amériques.



Archaeotrogonidés (genre *Archaeotrogon*) : apparentés aux Caprimulgi-formes (engoulevents) actuels ; leur aile présentait un éperon pointu. Éteints.

Horusornithidés (genre *Horusornis*) : petits rapaces, de la taille d'un petit faucon, mais avec des pattes très étroites et très allongées qui leur permettaient peut-être de capturer des insectes dans les cavités des arbres. Éteints.

Sylphornithidés (genre *Sylphornis*) : minuscules oiseaux, proches des Coraciiformes (groupe des todiers, des rolliers, des guépiers et des huppés). Éteints.



Quercypsittidés (genre *Quercypsitta*) : formes primitives de perroquets. Aujourd'hui : dans toutes les régions tropicales, particulièrement diversifiés en Australie et en Amérique du Sud.

Todiers (genre *Palaeotodus*) : petits oiseaux de quelques centimètres de long. Aujourd'hui : un seul genre, *Todus*, et cinq espèces vivant uniquement dans les Grandes Antilles.



Idiornithidés (genres *Idiornis* et *Elaphrocnenus*) : échassiers de taille moyenne. Aujourd'hui : proches des Cariamidés (*Cariama huppé* et *Cariama de Burmeister*), dans les pampas et les forêts clairsemées du centre de l'Amérique du Sud.



Sagittaires (genre *Pelargopappus*) : oiseaux de proie à grandes pattes d'échassiers. Aujourd'hui : un seul genre et une seule espèce, dans les steppes et dans les savanes africaines.



Gangas (genres *Archaeoganga* et *Leptoganga*) : proches des pigeons et particulièrement adaptés à la vie dans les régions semi-désertiques ou désertiques. Représentés dans le Quercy par des formes énormes. Aujourd'hui : Afrique, Madagascar, Sud de l'Europe et Asie centrale.



Martinets arboricoles (genre *Cypselavus*) : se différencient des autres martinets par leur plumage brillant et leur habitude de se percher et de nicher sur des arbres. Aujourd'hui : un genre et quatre espèces, en Asie du Sud-Est.



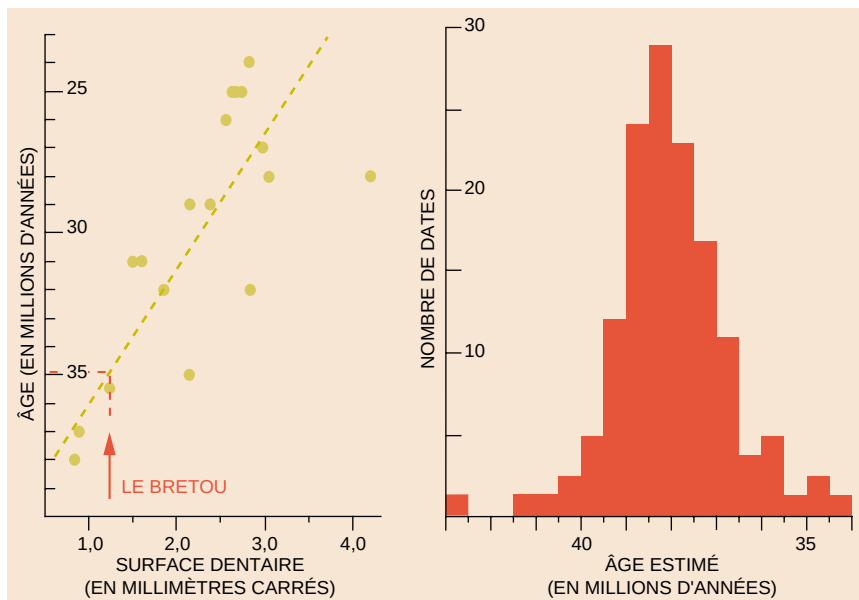
Phororhacidés (genre *Ameghinornis*) : oiseaux géants inaptes au vol, carnivores pourvus d'un énorme bec tranchant. Abondants et diversifiés en Amérique du Sud au Tertiaire (des formes géantes se sont développées). Éteints.



Colious (genre *Primocolius*) : petits oiseaux gris, se faufilent comme des rongeurs au milieu du feuillage. Aujourd'hui : deux genres et six espèces vivant uniquement en Afrique, au Sud du Sahara.

Podarges (genre *Quercypodargus*) : sortes d'engoulevents avec une immense bouche de grenouille, qui n'attrapent pas des insectes au vol, mais restent sur le sol et capturent des animaux rampants. Aujourd'hui : deux genres et 13 espèces, en Australie et en Asie du Sud-Est.





5. LA DATATION ABSOLUE DES SITES DU QUERCY est obtenue grâce à la variation de taille des dents des mammifères. Pour chaque lignée spécifique (à gauche, pour une lignée de petits rongeurs du genre éteint *Elfomys*) et chaque catégorie dentaire (ici les première et deuxième molaires inférieures, indistinguables lorsqu'elles sont isolées), on porte l'âge estimé du gisement dans l'échelle biochronologique relative (obtenu par répartition équidistante de niveaux repères dans l'intervalle de temps considéré) en fonction de la surface dentaire (produit de la longueur par la largeur). On trace ensuite la droite moyenne, qui correspond à une relation plus vraie : l'âge d'un gisement est celui qui correspond, sur cette droite, à la surface dentaire moyenne du gisement. On répète cette opération sur toutes les catégories dentaires de toutes les lignées disponibles et on obtient, pour chaque site, une distribution d'âges (à droite, pour le site du Breitou, 116 valeurs provenant de 28 lignées) qui permet le calcul d'un âge moyen et d'un intervalle d'incertitude : 38,05 millions d'années, plus ou moins 0,116 million d'années (la probabilité que la date soit dans cet intervalle est de 67 pour cent).

En revanche, les prospections purement paléontologiques, anticipées par le travail précurseur mais limité de Bernard Gèze en 1938, puis véritablement engagées par un travail collectif à partir de 1965, ont révélé que la faune de chaque cavité (ou parfois de chaque ensemble sédimentaire bien individualisé à l'intérieur d'une cavité) est très homogène : l'ensemble des espèces identifiées dans une même cavité sont contemporaines, à l'échelle des temps géologiques et de l'évolution. Chaque cavité a été comblée en quelques milliers d'années tout au plus. Les cavités sont petites par rapport aux zones lessivées par les écoulements : aussi une épaisseur donnée de sédiments se dépose-t-elle en un temps plus court que lors des sédimentations lacustres ou marines.

La datation des dépôts

Chaque population de la faune d'une cavité donnée représente un stade évolutif au sein d'une lignée. La comparaison de ces stades évolutifs indique la chronologie relative au sein de chaque lignée, et la confrontation des

chronologies des différentes lignées permet la définition d'une échelle «biochronologique» générale.

Cette démarche est classique en paléontologie. Ainsi, pour le Paléogène (il y a entre 65 et 24 millions d'années), une succession d'une trentaine de niveaux repères ont été définis à partir des faunes de mammifères : chaque niveau de référence correspond à une faune fossile de mammifères issue d'un gisement choisi pour sa richesse et sa valeur de représentation géographique la plus large possible. Plusieurs des faunes du Quercy, dégagées lors de fouilles récentes, ont été choisies comme niveaux repères.

En dehors de toute autre indication, on attribue habituellement un âge théorique, appelé bioâge, à chacun de ces niveaux repères, en les plaçant simplement à intervalles réguliers dans l'intervalle de temps considéré. Ces bioâges sont toutefois entachés d'une forte incertitude. Pourrait-on dater précisément les niveaux repères ?

Outre les transformations morphologiques, l'évolution des espèces se traduit par des changements de taille, le plus souvent des augmentations. Cet

accroissement de la taille, connu sous le nom de loi de Cope, est en particulier mesurable sur les dents, éléments du squelette généralement les mieux conservés (cette augmentation n'est toutefois pas une règle absolue : l'évolution conduit parfois à la réduction, puis à la disparition de certaines dents).

Lorsque l'on porte, sur un graphique, la taille moyenne des dents des populations successives d'une lignée spécifique, en fonction des bioâges des gisements d'où proviennent ces populations, les points se répartissent de part et d'autre d'une droite moyenne, dont on calcule les caractéristiques par régression linéaire (voir la figure 5). Cette droite représente la relation linéaire qui relie la taille des dents et le temps écoulé.

Si l'on considère que la droite représente une relation vraie, et que les écarts des points ne sont dus qu'à l'incertitude sur les bioâges, alors on peut replacer chaque point sur la droite, par translation en suivant l'axe temporel, et l'on obtient pour chaque gisement un nouvel âge, plus proche de l'âge véritable. On calcule ensuite la moyenne des âges obtenus pour toutes les dents de la lignée spécifique, et pour toutes les lignées spécifiques présentes. On calcule bien entendu simultanément l'intervalle d'incertitude associé à l'âge, qui est d'autant plus étroit que le nombre de lignées et le nombre de dents pour chaque lignée sont grands.

Nous avons vérifié que les âges numériques ainsi obtenus sont compatibles avec les dates fournies indépendamment par une méthode physique, la magnétostratigraphie. Le champ magnétique terrestre s'est inversé à de nombreuses reprises au cours de l'histoire de la Terre : son enregistrement dans les sédiments, lorsqu'ils se déposent dans des conditions calmes, définit une échelle de temps magnétostratigraphique valable sur tout le Globe. La datation de diverses roches a permis l'attribution d'un âge à chaque inversion du champ magnétique.

En 1993, François Lévêque, aujourd'hui au CEREGE, a montré que les sédiments des remplissages du Quercy ont enregistré le paléochamp magnétique terrestre. Les dates obtenues de cette façon pour les cavités étudiées concordent avec celles que nous avons calculées à partir des tailles des dents. Par exemple, la faune de la cavité du Breitou place celle-ci près du seizième niveau repère de l'échelle biochronologique, à la fin de l'Éocène moyen.

Dans l'échelle magnétostratigraphique, Le Bretou est daté de 38,426 à 38,113 millions d'années, tandis que le calcul fondé sur la taille des dents indique 38,05 millions d'années, plus ou moins 0,116 million d'années (moyenne de 116 valeurs données par 28 espèces de mammifères marsupiaux, insectivores, rongeurs, primates, créodontes (groupe de carnassiers primitifs) et ongulés).

De même, le remplissage de la cavité du Garouillas, qui a été choisie comme vingt-cinquième niveau repère (transition entre l'Oligocène inférieur et supérieur, il y a 28 millions d'années), est de 28,365 à 28,066 millions d'années sur l'échelle magnétostratigraphique et de 28,25 millions d'années plus ou moins 0,171 par le calcul de régression linéaire (moyenne de 141 valeurs pour 33 espèces de mammifères marsupiaux, insectivores, rongeurs, créodontes et ongulés).

De la faune au climat

La connaissance de la faune et sa comparaison avec les groupes actuels, par exemple pour les oiseaux (voir l'encadré page 65) donnent une idée de l'environnement et de ses changements pendant le Tertiaire : à l'Éocène, le Quercy est couvert de forêts, ouvertes par des espaces de savane. On y trouve des échassiers, dont les équivalents actuels vivent soit dans les pampas, soit dans les forêts clairsemées d'Amérique du Sud, ainsi que des formes forestières. Ce paysage s'ouvre progressivement, surtout à l'Oligocène supérieur, où il se transforme en savane arborée : les échassiers et les oiseaux forestiers sont toujours présents, mais ces derniers sont moins abondants à partir de l'Oligocène inférieur. Cette ouverture du paysage s'accompagne d'un assèchement : les formes qui préfèrent les milieux aquatiques, toujours rares, ne sont présentes qu'à l'Éocène, tandis que les formes qui vivent dans les steppes ou les savanes, ou dans les milieux semi-désertiques, apparaissent seulement à l'Oligocène supérieur.

Ce type de reconstitution du climat et de l'environnement végétal, à partir des caractéristiques morphologiques des espèces présentes, reste qualitatif. Pourrions-nous obtenir des informations plus précises ? Dans ce but, et en nous fondant sur la représentativité des restes de mammifères retrouvés dans les cavités du Quercy, nous avons mis au point une méthode

quantitative d'analyse des faunes, fondée sur la taille des animaux, nous inspirant d'une idée émise en 1964 par l'écologiste espagnol J. A. Valverde.

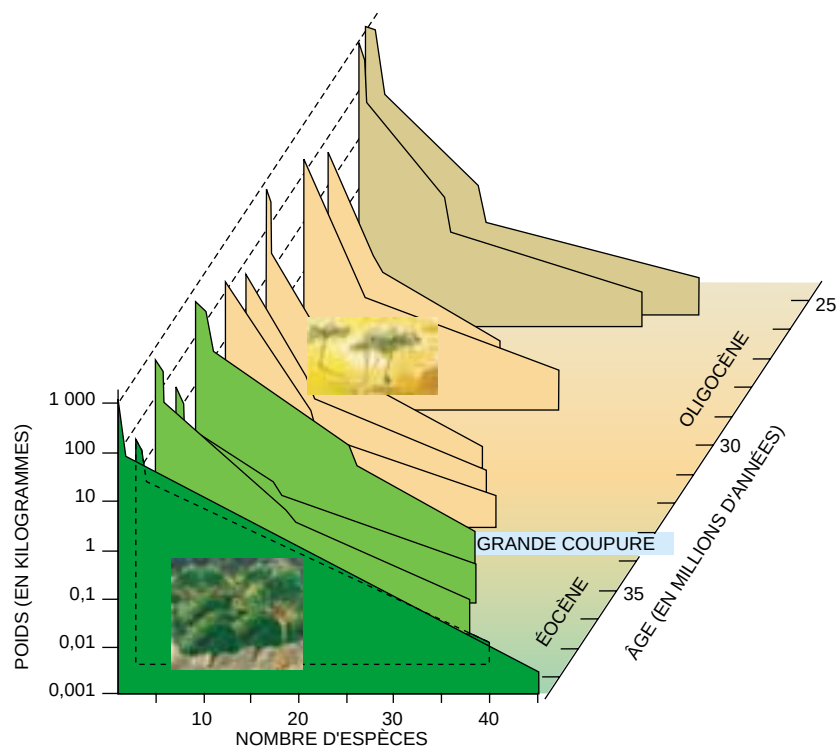
Notre analyse détaillée de nombreuses communautés actuelles de mammifères, sur différents continents et dans différents environnements tropicaux et subtropicaux, a démontré que, dans un ensemble biologique homogène, la distribution du poids moyen des espèces de mammifères est indépendante de la nature de ces espèces : elle est liée à des paramètres de l'environnement, tels les régimes de températures ou de précipitations, et le type de paysage. La taille détermine de nombreuses caractéristiques biologiques et écologiques des mammifères : les durées de vie et de gestation, les dimensions des territoires et les densités des peuplements, les relations de compétition et de prédation.

Les espèces de 0,5 à 10 kilogrammes sont rares lorsque le milieu est ouvert, de type savane ou désert, mais elles sont abondantes lorsque le milieu est fermé, de type forestier dense. Les espèces de

plus de dix kilogrammes sont abondantes lorsque le milieu est humide, alors qu'elles sont rares en milieu aride. Une baisse de température s'accompagne d'une diminution du nombre des espèces, en particulier pour celle de poids inférieur à 0,5 kilogramme.

On quantifie la structure pondérale d'une faune en construisant un diagramme nommé *cénogramme* (« graphique d'une communauté », en grec) (voir la figure 6) : on porte en ordonnée le logarithme du poids moyen des espèces, que l'on classe en abscisse par ordre de poids décroissant. Le profil ainsi défini, schématisé par des droites, est caractéristique de la communauté de mammifères étudiée : sur un intervalle pondéral donné, plus la pente est faible, plus il y a d'espèces ; la longueur de l'abscisse correspond au nombre total d'espèces dans la communauté.

Nous avons construit des *cénogrammes* pour les cavités les plus riches, qui couvrent près de 15 millions d'années entre la fin de l'Éocène et l'Oligocène supérieur (il y a 40 à 25 millions d'années). Chacune est représentative



6. LES CÉNOGRAMMES de plusieurs faunes de mammifères fossiles du Quercy représentent le poids moyen des espèces en fonction de leur nombre. Ils révèlent les variations climatiques et environnementales. Les faunes de l'Éocène, les plus anciennes (en vert) correspondent à des milieux forestiers et humides : il y a beaucoup d'espèces différentes, et dans toutes les catégories de taille. Après la Grande Coupure, qui marque la transition entre l'Éocène et l'Oligocène il y a environ 34 millions d'années et qui correspond au rattachement de l'Europe à l'Asie, le milieu ressemble plutôt à une savane aride (en beige) : en particulier, les grosses espèces sont moins nombreuses. Il y a 26 millions d'années (en beige), le milieu, toujours ouvert, redevient plus humide et plus chaud : le nombre total d'espèces réaugmente.

de la faune sur une période de temps assez courte. Nous avons mis en évidence un changement important de structure des communautés à la transition entre l'Éocène et l'Oligocène, il y a environ 34 millions d'années. Ce changement reflète la crise climatique qui se produit à l'échelle du globe au tout début de l'Oligocène : dans le Quercy, le climat se refroidit et s'aridifie, et la forêt recule.

Les faunes anciennes de l'Éocène supérieur, avec de nombreuses espèces de moyenne et de grande taille, correspondent à des milieux forestiers et humides proches des forêts tropicales actuelles d'Afrique. Un léger décrochement observé dans la distribution des espèces vers 0,5 kilogramme témoignerait de la présence de zones ouvertes dans ces forêts. À partir du début de l'Oligocène, les espèces de grande taille sont moins nombreuses et les espèces de taille intermédiaire deviennent rares : les milieux sont plus arides et plus ouverts, et les paysages ressemblent aux savanes plus ou moins arborées de l'Est africain actuel. La réduction du nombre des espèces marque aussi un refroidissement, ou tout au moins une saisonnalité des températures, avec un hiver plus froid. Cette saisonnalité thermique, qui se superpose à une saisonnalité des pluies, laisse penser que, dès le début de l'Oligocène, le climat préfigurerait le climat méditerranéen actuel.

Cette détérioration climatique correspond à un événement paléogéographique important : l'Europe, jusqu'alors isolée vers l'Est par des bras

de mer, est mise en connexion avec l'Asie. Une vague d'immigration, connue sous le nom de Grande Coupure, se produit alors, bouleversant les faunes d'Europe occidentale. L'arrivée en Europe de nombreuses familles nouvelles est favorisée par le changement de milieu qui y est survenu.

Un laboratoire de l'Évolution

En 1977, lors du premier colloque de paléontologie consacré aux gisements des phosphorites du Quercy, la région a été qualifiée de «laboratoire naturel de l'Évolution». Cette appellation n'était pas usurpée : non seulement le Quercy est un exceptionnel observatoire de l'Évolution, mais il permet aussi de tester et de mettre au point de nouvelles méthodes d'analyse en paléontologie.

Les prospections continuent, et le temps est notre allié : dans les prochains siècles, l'érosion continuera de découvrir de nouvelles poches argileuses contenant de nouveaux fossiles. Des zones aujourd'hui boisées en cachent aussi de nombreuses. Les plus récentes découvertes ont étendu l'intervalle de temps connu par ces dépôts du Quercy sur une durée continue de près de 35 millions d'années, de l'Éocène inférieur (il y a 55 millions d'années) au Miocène inférieur (il y a 20 millions d'années), et de nouveaux gisements datés du Pliocène (entre 5 et 2 millions d'années) ont été identifiés. Dans le futur, on pourra suivre l'évolution de la faune du Quercy, donc de l'Europe de l'Ouest, sur toute la durée de l'ère tertiaire.

DES CAILLOUX DANS LES CHOSSES SÛRES

DIDIER NORDON

Des cailloux dans les choses sûres



Didier Nordon épingle les scientifiques et les politiques qui extraient de la science plus qu'elle ne dit. Nul doute que chacun reconnaîtra dans ces piques... le défaut de son condisciple.

144 pages - 70 F

Code 1897

**POUR LA
SCIENCE**
DIFFUSION BELIN

Bon de commande en p. 104

Cécile MOURER-CHAUVIRÉ, Serge LEGENDRE et Bernard SIGÉ sont chercheurs au Laboratoire de paléontologie de l'Université Claude Bernard et du CNRS, à Lyon. Bernard MARANDAT est chercheur à l'Institut des sciences de l'évolution de Montpellier.

Nous remercions toutes les personnes qui ont participé aux fouilles ou qui les ont rendu possibles. La liste complète figure sur le site Web de *Pour la Science* (<http://www.pourlascience.com>).

International symposium on mammalian biostratigraphy and paleoecology of the European Paleogene, February 18th-21st 1987, édité par N. Schmidt-Kittler, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen (A), vol. 10, pp. 1-311, Mainz, 1987.

S. LEGENDRE, *Les communautés de mam-*

mifères du Paléogène (Éocène supérieur et Oligocène) d'Europe occidentale : structures, milieux et évolution, Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen (A), vol. 16, pp. 1-110, 1989.

B. SIMON-COINÇON et J.-G. ASTRUC, *Les pièges karstiques en Quercy : rôle et signification dans l'évolution des paysages*, Bulletin de la Société géologique de France, vol. 162, n°3, pp. 595-605, 1991.

S. LEGENDRE et al., *Les Phosphorites du Quercy : 30 ans de recherche. Bilan et perspectives*, *Geobios*, mémoire spécial 20, pp. 331-345, 1997.

Tableaux de corrélations et synthèses, in *Actes du Congrès BiochroM'97*, édité par J.-P. Aguilar, S. Legendre et J. Michaux, Mémoires et Travaux de l'EPHE, Institut de Montpellier, vol. 21 pp. 769-805, 1997.

