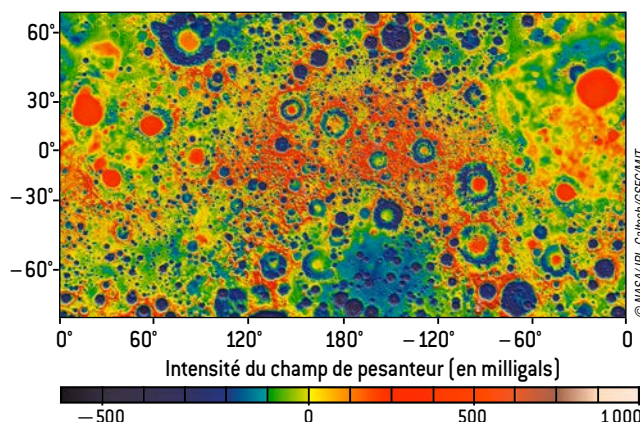


DES SONDES JUMELLES POUR AUSCULTER LA CROÛTE LUNAIRE

En 2012, la Nasa a envoyé les deux sondes jumelles de la mission GRAIL (pour *Gravity Recovery And Interior Laboratory*) en orbite autour de la Lune. En mesurant les variations de distance entre les deux sondes qui suivaient la même trajectoire, les chercheurs ont obtenu une cartographie très précise du champ de gravité lunaire. En couplant ces observations à des mesures topographiques, les planétologues ont amélioré leur connaissance de la croûte de la Lune. Les propriétés globales de la croûte sont le résultat direct du processus de cristallisation de l'océan de magma, et donc de la composition globale de la Lune. La précision inégalée de la mission GRAIL a permis d'améliorer les estimations de l'épaisseur de la croûte. En l'occurrence, les données suggèrent que la densité moyenne est bien plus faible qu'on ne le pensait précédemment, ce qui implique que l'épaisseur moyenne de la croûte, entre 34 et 43 kilomètres, est aussi inférieure à celle qui était attendue. L'une des conséquences directes de ces observations est que la Lune a une concentration en éléments réfractaires (tels les éléments radioactifs) similaire à celle de la Terre.



CARTE DU CHAMP DE GRAVITÉ mesuré par les sondes GRAIL. Elle permet d'identifier des cratères et des bassins où la croûte plus mince correspond à un champ de gravité moins intense (en bleu) et des plateaux où le champ est plus élevé (en rouge).

le manteau sous-jacent, créant ainsi une structure instable. On rejoint ici le scénario proposé pour expliquer l'asymétrie de composition de la croûte : cette couche coule dans le manteau et remonte préférentiellement vers la face visible, en particulier dans la région de Procellarum KREEP Terrane. En remontant, avec la baisse de pression, la couche fond et produit le type de volcanisme attendu en surface. L'un des succès de ce modèle est la temporalité : les coulées les plus anciennes ont au plus 300 millions d'années. Il semble aussi compatible avec l'idée que les éléments plus denses ont tendance à s'enfoncer dans le manteau. En revanche, la composition de ces laves ne correspond pas directement aux observations. Dans ce scénario, on s'attend à ce que les basaltes soient riches en éléments incompatibles, ce qui n'est pas clairement le cas.

Des volcans sur la Lune

Une autre version considère cet enrichissement en éléments radioactifs comme la cause du volcanisme. En supposant que, lors de la réorganisation interne des éléments incompatibles, ils se soient accumulés dans la région de Procellarum, la couche formée aurait chauffé jusqu'à faire fondre la partie supérieure du manteau et produire une activité volcanique locale qui n'a pu durer jusqu'à récemment. Le processus s'étale sur une durée qui correspond aussi au délai d'observation des premières coulées de lave. L'étude d'échantillons ramenés de la surface

lunaire suggère que les éléments radioactifs sont surtout mélangés à la croûte et peu présents dans les coulées de lave, ce qui renforce cette version de l'histoire lunaire.

Aucun des deux scénarios n'est encore pleinement satisfaisant. Dans le premier cas, les conditions pour expliquer la migration des éléments radioactifs sont incertaines. Comme nous l'avons vu, il n'existe pas encore de mécanisme généralement admis permettant d'expliquer la répartition hétérogène des éléments incompatibles sous la croûte lunaire. Un tel modèle est aussi nécessaire pour apporter du poids au second modèle. Par ailleurs, l'évolution du manteau a des conséquences directes sur l'évolution du noyau et donc sur la génération du champ magnétique primordial.

L'histoire de la Lune nous cache-t-elle encore d'autres surprises ? On le saura peut-être bientôt grâce au regain d'intérêt pour l'exploration lunaire. Des missions préparées par les grandes puissances du domaine de l'exploration spatiale pourraient conduire à de grandes découvertes même si elles n'ont pas toutes des objectifs scientifiques.

Les observations de la Lune nous révèlent, pour l'instant, une image incomplète dont les pièces ne s'ajustent pas toujours bien entre elles. Les astronomes ont néanmoins beaucoup progressé, ces dernières décennies, dans leur compréhension du compagnon de la Terre. Et la Lune, qui a longtemps été considérée comme un corps inerte à l'histoire peu palpitante se révèle être un corps céleste actif et fort intrigant. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

M. A. Siegler *et al.*, *Lunar true polar wander inferred from polar hydrogen*, *Nature*, vol. 531, pp. 480-484, 2016.

M. Touboul *et al.*, *Tungsten isotopic evidence for disproportional late accretion to the Earth and Moon*, *Nature*, vol. 520, pp. 530-533, 2015.

B. P. Weiss et S. M. Tikoo, *The lunar dynamo*, *Science*, vol. 346, n° 6214, 2014.

D. Cébron *et al.*, *Le magnétisme de la Lune*, *Pour la Science*, n° 424, février 2013.

M. A. Wieczorek *et al.*, *The crust of the Moon as seen by GRAIL*, *Science*, vol. 339, n° 6120, 2013.

M. Ohtake *et al.*, *Asymmetric crustal growth on the Moon indicated by primitive farside highland materials*, *Nature Geoscience*, vol. 5, pp. 384-388, 2012.

M. Cuk et S. T. Stewart, *Making the Moon from a fast-spinning Earth : A giant impact followed by resonant despinning*, *Science*, vol. 338, n° 6110, 2012.

Gastornis

l'oiseau carnivore devenu végétarien

Delphine Angst, Eric Buffetaut, Christophe Lécuyer et Romain Amiot

***Gastornis* ? Un oiseau géant au bec puissant
qui dévorait les mammifères à l'aube du Tertiaire,
a-t-on longtemps pensé. Erreur : le colosse était herbivore.**



© Alan Bénétteau/paleospot.com

APPARU EN EUROPE il y a
quelque 60 millions d'années,
Gastornis, malgré sa taille
de 1,5 mètre et son bec
imposant, était probablement
un oiseau placide, à l'image
de cette reconstitution
du paléontographe
Alain Bénétteau.





Si vous entrez le mot *Gastornis* sur Internet, la plupart des images que vous trouverez seront celles d'un impressionnant oiseau géant attaquant avec férocité de petits mammifères. Et pour cause. Depuis la découverte, à la fin du XIX^e siècle et au début du XX^e, de plusieurs ossements de cette espèce disparue du début du Tertiaire, les reconstructions de l'animal le présentaient tel une grue terrifiante, un rapace terrestre maître du monde au Paléocène qui aurait décliné avec l'avènement des mammifères carnivores, comme l'écrivait encore en 1971 le paléontologue finlandais Björn Kurtén dans son livre *The Age of Mammals*.

Certes, le scénario de l'oiseau carnivore est tentant, d'autant qu'il s'inscrit bien dans l'histoire de la faune terrestre. Jusqu'à la fin du Crétacé en effet, les plus grands animaux terrestres étaient les dinosaures. Ils avaient des tailles et des modes de vie très variés leur permettant de se répartir dans les différentes niches écologiques. Mais durant la crise Crétacé-Tertiaire, il y a 66 millions d'années, ces dinosaures se sont éteints, laissant libres de très nombreuses niches écologiques continentales. Ainsi, juste après l'extinction des dinosaures, au

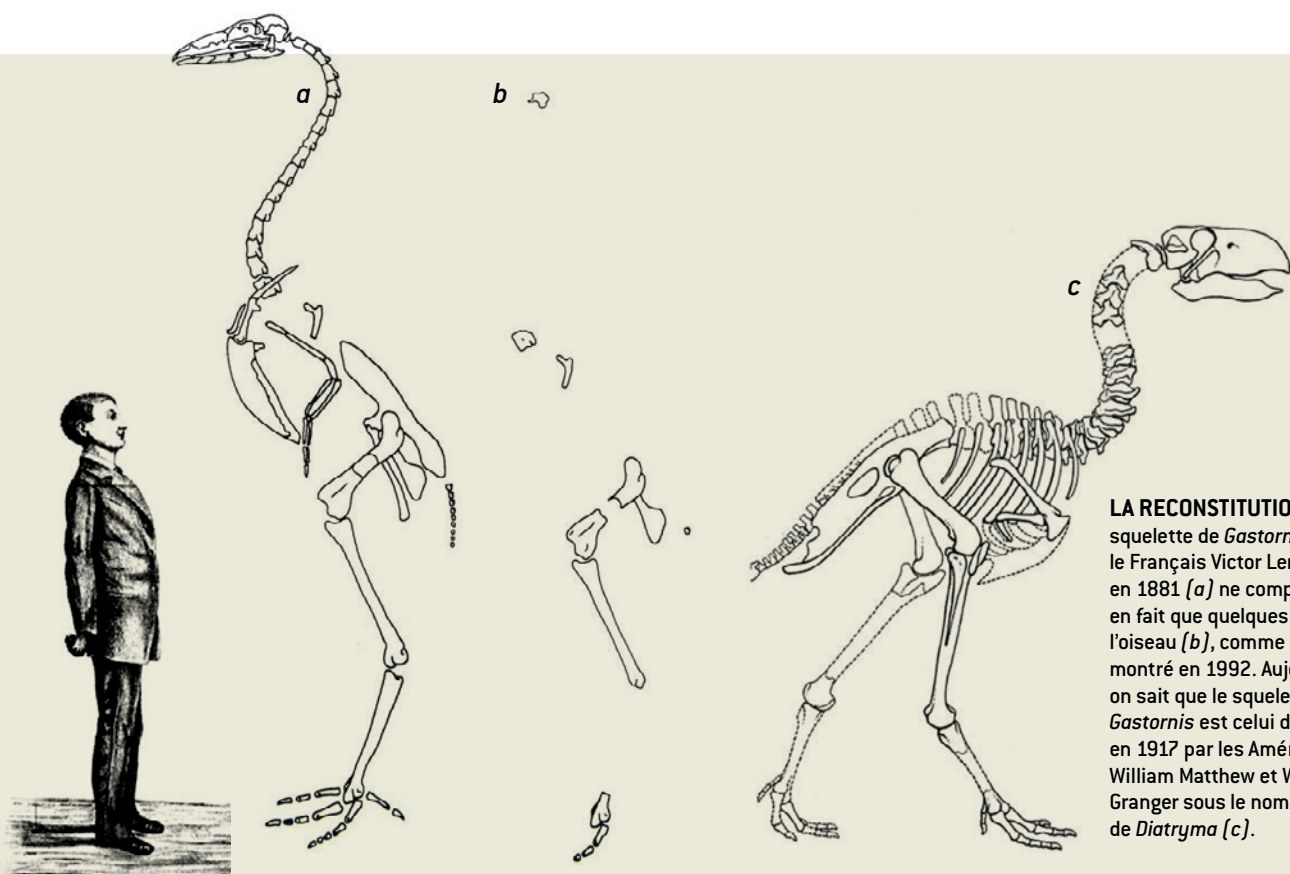
L'ESSENTIEL

- En 1855, un os d'oiseau géant du Tertiaire fut découvert près de Meudon, puis d'autres furent trouvés en Europe, en Asie et aux États-Unis.
- Jusqu'en 2014, la majorité des reconstitutions de l'oiseau *Gastornis* l'ont présenté comme un terrible prédateur.
- De nouvelles études sur ses ossements montrent qu'il s'agissait plutôt d'un herbivore se déplaçant lentement.
- Cette histoire témoigne de l'impact des reconstitutions et de l'imaginaire collectif sur les interprétations paléontologiques.

début du Tertiaire, le seul animal terrestre de grande taille était *Gastornis*. Alors que les mammifères ne dépassaient pas la taille d'un gros chien, ces oiseaux mesuraient environ 1,5 mètre de haut. Apparus en Europe au Paléocène, il y a quelque 60 millions d'années, ces géants s'éteignirent au milieu de l'Éocène, il y a environ 42 millions d'années, après avoir colonisé l'Amérique du Nord et l'Asie.

En quoi ces oiseaux ont-ils été les successeurs des dinosaures dans les environnements terrestres post-crise ? Quelle niche écologique occupaient-ils ? Comment vivaient-ils ? Qu'il s'agisse de leur régime alimentaire, de leur mode de locomotion ou de leur stratégie de reproduction, ces questions sont longtemps restées sans réponse, d'autant que l'histoire de la découverte de *Gastornis* a eu plusieurs rebondissements qui ont brouillé les pistes. Mais de nouvelles études viennent de résoudre une partie du mystère grâce à des approches pluridisciplinaires combinant paléontologie classique et nouvelles technologies. *Gastornis* serait plus proche du placide takahé de Nouvelle-Zélande que d'un terrible prédateur.

Le premier fossile de *Gastornis* fut découvert en 1855 dans le conglomérat



LA RECONSTITUTION du squelette de *Gastornis*, par le Français Victor Lemoine en 1881 [a] ne comportait en fait que quelques os de l'oiseau [b], comme cela fut montré en 1992. Aujourd'hui, on sait que le squelette de *Gastornis* est celui décrit en 1917 par les Américains William Matthew et Walter Granger sous le nom de *Diatryma* [c].

a, b, c : clichés des auteurs

de Meudon, près de Paris. Ce fossile, correspondant à un tibiotarse (os de la patte), fut nommé *Gastornis parisiensis* en l'honneur du physicien Gaston Planté, son découvreur. Par la suite, Victor Lemoine, médecin à Reims et passionné de paléontologie, exhuma des fossiles complémentaires de *Gastornis* dans le nord-est de la France et, dès 1881, en proposa une reconstitution : un grand oiseau aux longues pattes et aux ailes réduites, arborant un long cou et un bec assez allongé (voir la figure page ci-contre). À en croire le médecin, ses mâchoires portaient des excroissances peut-être assimilables à des dents. Ainsi, à une époque où les idées de Darwin se répandaient chez les paléontologues, *Gastornis* semblait être un animal intermédiaire entre les reptiles et les oiseaux.

Diatryma contre *Gastornis*

Parallèlement, en 1876 en Amérique du Nord, le paléontologue Edward Cope décrit un nouveau fossile d'oiseau géant qu'il nomma *Diatryma* en indiquant qu'il était proche de *Gastornis*. Durant plusieurs décennies, les deux noms coexistèrent, les fossiles trouvés en Europe prenant le nom de *Gastornis* et ceux d'Amérique du Nord celui de *Diatryma*. En 1917, cependant, deux autres paléontologues américains, William Matthew et Walter Granger, décrivent un squelette quasiment complet de *Diatryma* provenant de l'Éocène inférieur du Wyoming et permettant une reconstitution globale de cet oiseau, caractérisé par une grosse tête au bec énorme et sans dents que portait un cou robuste.

Les différences particulièrement marquées entre cette reconstitution et celle de *Gastornis* faite par Lemoine plus de trente ans auparavant aboutirent à séparer nettement les genres *Diatryma* et *Gastornis*. De plus, l'excellente conservation du fossile américain éclipsa les ossements isolés de *Gastornis*. C'est pourquoi, à partir des années 1920, la grande majorité des spécimens européens furent attribués à *Diatryma* plutôt qu'à *Gastornis*.

Cette situation dura jusqu'au début des années 1990, lorsque le paléontologue américain Larry Martin fit une révision

Les os
appartenaient en
fait pour la plupart
à divers autres animaux :
tortues, poissons et une
sorte de crocodile

complète du matériel de *Gastornis* que Lemoine avait rassemblé pour sa reconstitution. Martin mit alors en évidence que la grande majorité des os utilisés n'appartenait ni à *Gastornis* ni même à un oiseau.

Les fossiles correspondaient à divers autres animaux comprenant aussi bien des tortues que des poissons ou des champsosaures (sortes de reptiles aquatiques ressemblant à des crocodiles). Le principal argument séparant *Gastornis* de *Diatryma* était donc sérieusement remis en cause. Martin proposa alors de regrouper ces deux genres au sein d'une même famille : les Gastornithidae.

Mieux : le réexamen récent des fossiles, dont l'étude d'une nouvelle mandibule de *Gastornis*, a montré qu'il s'agit d'un seul et même genre qui doit être appelé *Gastornis*, ce nom ayant été proposé en premier et *Diatryma* en étant un synonyme. Il s'agit là d'un exemple tout à fait marquant de l'importance que les reconstitutions peuvent avoir sur l'évolution des interprétations paléontologiques, car sans la représentation erronée de *Gastornis* réalisée par Lemoine, le nom de *Diatryma* ne se serait peut-être jamais imposé.

Pas de dents, **mais un bec étrange**

Gastornis n'avait donc pas de dents, mais la question de son écologie, et notamment de son régime alimentaire, n'était pas résolue pour autant... Elle ne le fut pas avant 2014. Et là encore, les représentations que l'on se faisait de l'oiseau ont eu un impact important, non seulement sur les interprétations scientifiques, mais aussi sur l'imaginaire collectif.

De fait, afin de mieux comprendre comment étaient organisés les écosystèmes terrestres suite à l'extinction des dinosaures, une des premières questions que se sont posées les scientifiques concerna le régime alimentaire de ces oiseaux. Pour la majorité des vertébrés fossiles, l'étude du régime alimentaire est fondée sur celle des dents. Les Gastornithidae en étant dépourvus, la méthode était inapplicable. Dans le cas des oiseaux, cependant, un autre indice permet en général de résoudre la question : la forme du bec, que l'on compare à celle des oiseaux actuels d'écologie connue.

■ LES AUTEURS

Delphine ANGST, paléontologue et géochimiste, est postdoctorante à l'université de Cape Town, en Afrique du Sud.

Eric BUFFETAUT est paléontologue au Laboratoire de géologie de l'École normale supérieure, à Paris (CNRS, UMR 8538).

Christophe LÉCUYER est professeur au Laboratoire de géologie de Lyon (LGLTPE), à l'université de Lyon 1 et membre de l'institut universitaire de France.

Romain AMIOT est chargé de recherche dans le même laboratoire.

Mais les Gastornithidae sont particuliers, car leur bec ne ressemble à celui d'aucun groupe actuel. Cette spécificité a donc été à l'origine d'un débat vieux de plus de vingt ans sur le régime alimentaire de *Gastornis*.

En 1991, en se fondant sur une étude biomécanique de la mâchoire de ces oiseaux, Lawrence Witmer et Kenneth Rose, de l'université Johns Hopkins, ont conclu qu'il s'agissait de féroces prédateurs. Un an plus tard, en 1992, l'ornithologue américain Allison Andors fit une étude similaire sur les mêmes fossiles et conclut à un régime herbivore. La contradiction entre les conclusions de ces deux études, quasi-simultanées, sur le même matériel fossile, et avec des méthodes très proches, montre les limites des méthodes comparatives classiques de paléontologie.

Ignorant le débat, jusqu'en 2014, la majorité des représentations de *Gastornis*

mettent en scène un terrible prédateur pourchassant de petits mammifères, alors que quasiment aucune reconstitution ne suggère qu'il pourrait être herbivore. Ce choix délibéré, probablement motivé par des raisons plus ou moins sensationnalistes, a eu des conséquences importantes sur l'image collective du régime alimentaire de *Gastornis*. Ainsi, même des documentaires sérieux ou des revues scientifiques de qualité pour le grand public ont totalement occulté la seconde hypothèse. Ce choix de représentation est à l'origine d'un bon nombre de confusions entre les Gastornithidae et les Phorusrhacidae, des oiseaux géants terrestres carnivores et coureurs connus en Amérique du Sud et du Nord, en Afrique du Nord et en Europe, mais pour des périodes plus récentes, et dont l'anatomie est très différente de celle des Gastornithidae.

Des muscles de pintade

Le débat sur le régime alimentaire de *Gastornis* ne s'est clos qu'en 2014 avec de nouvelles études que nous avons menées. Faute de trouver la réponse par les voies classiques, nous avons cherché d'autres méthodes. Nous avons opté pour deux approches complémentaires : une étude de morphologie fonctionnelle et une étude de géochimie isotopique.

La morphologie fonctionnelle consiste à étudier le lien entre l'écologie d'un animal et ses capacités mécaniques. Ainsi, avec la collaboration d'Anick Abourachid et Anthony Herrel, du Muséum national d'histoire naturelle, à Paris, nous avons étudié les muscles du crâne de divers oiseaux actuels dont on connaissait l'écologie afin de voir s'il existait un lien entre le type de nourriture que ces oiseaux consomment et la musculature de leur mâchoire.

Des rapaces représentaient les oiseaux carnivores et des poulets, pintades et pinsons, les oiseaux herbivores. Après avoir disséqué plusieurs crânes de ces oiseaux actuels, nous avons mesuré et pesé l'ensemble des muscles du crâne. Nous avons ainsi montré que chez les oiseaux carnivores actuels, le muscle permettant de fermer la mâchoire (muscle adducteur) est peu développé, alors que celui permettant de mouvoir la pointe du bec (muscle ptérygoïde) est très gros (voir la figure page 43). Cela est dû à la façon dont ces animaux se nourrissent,

Des mesures isotopiques

Comment déterminer si *Gastornis* était plutôt carnivore ou herbivore ? Une méthode consiste à étudier la proportion des isotopes de carbone dans les ossements de l'animal et de la comparer avec celle d'oiseaux actuels carnivores ou herbivores.

Les isotopes d'un élément chimique X présentent le même nombre de protons dans leur noyau, mais un nombre différent A de neutrons et sont alors notés AX .

Un isotope avec un petit nombre de neutrons est dit léger et, à l'inverse, celui avec le plus grand nombre de neutrons est dit lourd. Il existe deux grands types d'isotopes : les isotopes stables et les isotopes radioactifs.

Les isotopes radioactifs se transforment en un autre élément avec émission de radioactivité, et ce au bout d'un temps moyen connu et spécifique de chaque élément – sa constante de désintégration. Par exemple, l'isotope du carbone à 14 neutrons, le carbone 14 ou ^{14}C , se

transforme en azote 14 (^{14}N) en environ 5700 ans.

À l'inverse, les isotopes stables correspondent à des éléments ne pouvant pas se désintégrer, et restant stables au cours du temps.

Dans le cas du carbone, il existe deux isotopes stables, le carbone 12 (^{12}C) et le carbone 13 (^{13}C).

Ces deux isotopes sont présents en différentes proportions dans les structures géologiques ou biologiques, sans variations au cours du temps. La proportion d'isotopes lourds ^{13}C par rapport aux isotopes légers ^{12}C est définie par le rapport isotopique $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Dans le cas des isotopes stables, les différences de rapports isotopiques entre plusieurs réservoirs sont très faibles, ne dépassant pas la cinquième ou sixième

décimale. C'est pourquoi, afin de comparer plusieurs rapports isotopiques de façon précise, la notation delta (δ) a été proposée.

Cette notation compare le rapport isotopique de l'échantillon par rapport à celui d'un standard et est exprimée en pour mille (‰). Un delta positif correspond donc à un enrichissement de l'échantillon en isotopes lourds par rapport au standard.

Dans le cas de l'étude du régime alimentaire de *Gastornis*, c'est donc le $\delta^{13}\text{C}$ du carbonate de l'apatite des os qui est mesuré afin de savoir s'il était plutôt carnivore ou herbivore. On le compare à celui d'oiseaux actuels suivant l'un ou l'autre de ces régimes, en supposant que la physiologie de *Gastornis* était similaire, et on en déduit le rapport isotopique de sa nourriture, qui indique si elle est animale ou végétale. Résultat : celle de *Gastornis* était végétale...

- D. A.



en arrachant des morceaux de viande avec la pointe de leur bec et en les gobant sans les broyer. Ils ont donc besoin d'une grande puissance à l'avant de leur bec et d'une faible puissance de broyage au moment de refermer la mâchoire. À l'inverse, chez les oiseaux herbivores actuels, le muscle adducteur est très développé, leur permettant de broyer des plantes et des graines dures, alors que le muscle ptérygoïde est très réduit.

Une fois ce modèle établi, nous l'avons appliqué aux Gastornithidae, dont deux mâchoires particulièrement bien préservées (conservées au Muséum de New York et au Muséum de Toulouse) portent les traces des zones d'insertion de ces deux muscles, ce qui permet d'estimer leur importance relative. Ces traces montrent que *Gastornis* présentait un muscle adducteur très développé et un muscle ptérygoïde très réduit, et qu'il avait donc un régime alimentaire herbivore.

Parallèlement à cette étude, nous avons utilisé une seconde approche, la géochimie isotopique, pour déterminer indépendamment le régime alimentaire de *Gastornis*. Cette approche est fondée sur l'analyse isotopique du carbone présent dans les ossements des oiseaux et dans leur nourriture, c'est-à-dire sur l'analyse de la proportion des isotopes de carbone dans

GASTORNIS a longtemps été mis en scène comme un terrible prédateur de mammifères...

ces éléments (voir l'encadré page ci-contre). En effet, cette proportion diffère dans les plantes et dans la viande. Elle dépend aussi de la physiologie de l'animal : lorsqu'un animal se nourrit, il incorpore dans ses os et dans ses dents une certaine proportion des isotopes de carbone en fonction de son métabolisme. On dit qu'il y a un fractionnement isotopique entre les tissus minéralisés (os, dents) et l'alimentation. Par conséquent, si l'on connaît la valeur de ce fractionnement isotopique chez un animal, on peut, à partir de l'analyse isotopique de ses ossements, en déduire la proportion des isotopes de carbone dans les aliments qu'il a consommés, et ainsi remonter à son régime alimentaire.

Un oiseau herbivore

Chez un animal actuel dont on connaît les habitudes alimentaires, déterminer la valeur du fractionnement isotopique est simple : il suffit de mesurer la proportion des isotopes dans les ossements et d'en soustraire celle de sa nourriture. Aussi avons-nous d'abord effectué l'étude sur des oiseaux actuels d'écologie connue : un modèle carnivore – des vautours – et un modèle herbivore – des autruches – nous ont fourni deux valeurs différentes du fractionnement isotopique des oiseaux

en fonction de leur régime alimentaire. Grâce à ces données, et en considérant que les oiseaux du Tertiaire avaient une physiologie très proche de celle des oiseaux actuels, nous avons déterminé le régime alimentaire de *Gastornis*.

En effet, les mesures isotopiques du carbone de *Gastornis* ont permis d'estimer que si ces oiseaux étaient carnivores, ils devaient consommer de la viande issue d'animaux ne s'étant nourris que de plantes de type C4 (des plantes adaptées aux environnements secs). Or, dans l'histoire de la Terre, ce type de plantes n'est apparu que beaucoup plus récemment. Les Gastornithidae ne pouvaient donc pas être carnivores. À l'inverse, l'hypothèse d'un régime alimentaire herbivore est confirmée, car les proportions isotopiques des plantes consommées alors déduites sont cohérentes avec celles connues pour les végétaux de l'époque. *Gastornis* n'était donc pas un féroce prédateur s'attaquant aux malheureux petits chevaux du Tertiaire, mais plutôt un oiseau herbivore.

Un autre point de l'écologie des Gastornithidae qui a été faussé par les représentations est sa locomotion. Sur la grande majorité des illustrations représentant *Gastornis*, non seulement cet oiseau est carnivore, mais il pratique une chasse active en poursuivant

ses proies sur un modèle proche de celui des grands prédateurs actuels tels que les fauves (voir la figure page 41). Mais *Gastornis* était-il réellement capable de courir de cette façon ? En d'autres termes, l'oiseau avait-il une locomotion dite cursoriale (coureur), avec la possibilité de longues périodes de course rapide, ou était-il graviporteur (marcheur), c'est-à-dire de locomotion relativement lente, capable de courir, mais seulement sur de courtes durées ?

Coureur ou marcheur ?

Dans les années 1960, l'ornithologue américain William Storer a proposé une méthode pour discriminer ces deux modes de locomotion, fondée sur les proportions des trois os longs formant la patte d'un oiseau : le fémur, le tibiotarse et le tarsométatarse. Un oiseau coureur aura un tarsométatarse plus long par rapport aux deux autres os de la patte et, à l'inverse, le tarsométatarse d'un oiseau marcheur sera plus court. En appliquant ce modèle à *Gastornis*, on montre que cet oiseau était graviporteur, incapable de courir vite et longtemps...

Un des derniers éléments de l'écologie des Gastornithidae découvert ces dernières

COMMENT ON REMONTE DES COQUILLES À *GASTORNIS*

En Provence et dans les Corbières, on connaît depuis les années 1950, dans les dépôts continentaux du début du Tertiaire, des fragments de coquilles d'œufs de grands oiseaux, souvent présents en abondance. Il avait été suggéré que *Gastornis* avait pu les pondre. Afin de tester cette hypothèse, nous avons récolté sur le terrain de nombreux fragments et étudié chacun en détail.

En Europe, pour cette période, seuls trois genres d'oiseaux fossiles de grande taille sont connus : *Gastornis*, *Palaeotis* et *Remiornis*. Leurs tailles étant différentes, celles de leurs œufs devaient l'être aussi. L'estimation de la taille des œufs grâce à l'étude des fragments de coquilles nous a permis d'identifier lequel de ces trois oiseaux les avait pondus.

Les courbures maximales et minimales des coquilles d'œuf

ont été mesurées pour tous les fragments de taille suffisante. À partir de ces mesures et de différentes relations établies pour des émeus actuels, nous avons estimé que les œufs mesuraient environ 12 centimètres (cm) de largeur et 19 de longueur.

Connaissant la taille des œufs pondus par les oiseaux tertiaires dans le sud de la France, on calcule alors leur volume puis leur masse grâce à différentes

équations. Les œufs pondus avaient un volume d'environ 1330 cm³ et une masse d'environ 1,4 kilogramme, ce qui correspond à des valeurs proches de ce qui est connu pour les plus gros œufs d'autruches actuelles.

De tels œufs correspondent à des oiseaux de très grande

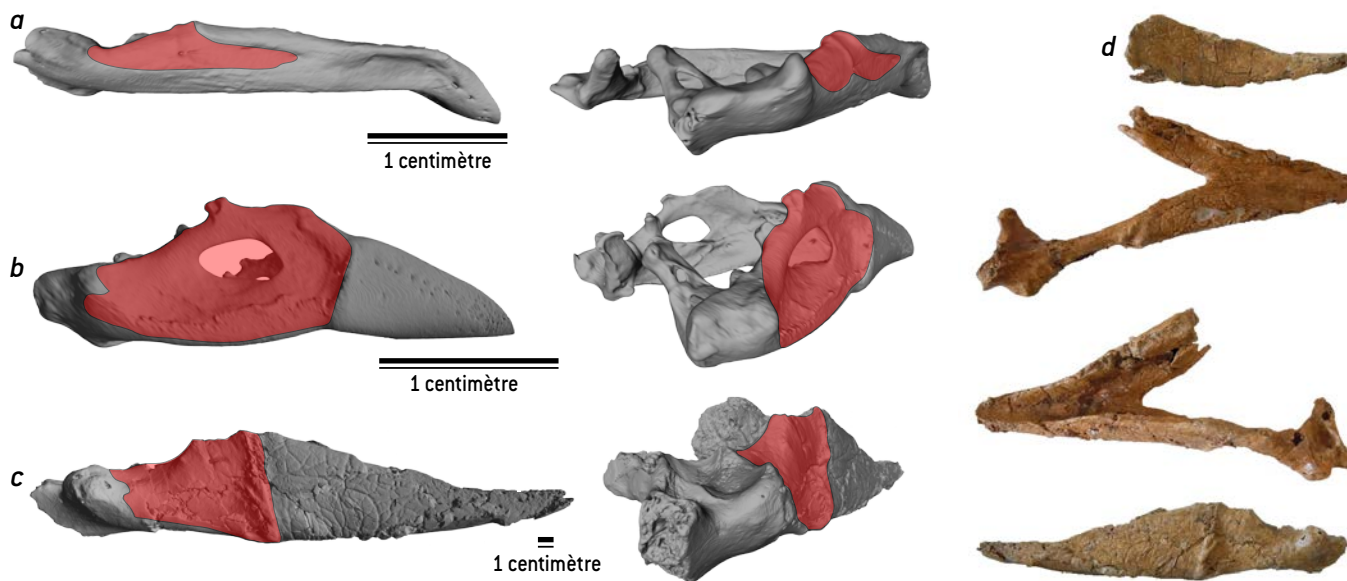
taille, pesant jusqu'à 150 kilogrammes. Parmi les oiseaux connus en Europe à cette période, seul *Gastornis* aurait pu pondre de tels œufs. À partir de cette conclusion, on déduit nombre d'informations sur la stratégie de reproduction des Gastornithidae.

- D. A.



MINUSCULES, les fragments de coquilles trouvés dans le sud de la France permettent tout de même, en mesurant leur courbure, d'estimer la taille des œufs, et de là celle de l'oiseau qui les a pondus.

Cliché des auteurs



LE MUSCLE ACTIONNANT LA MÂCHOIRE D'UN OISEAU, le muscle adducteur, ne se développe pas de la même façon selon que l'animal est carnivore ou herbivore. Chez un oiseau carnivore actuel tel une buse, sa

zone d'insertion sur la mâchoire est petite (a, en rouge). Chez un oiseau herbivore tel le pinson de Darwin, elle est large (b), tout comme chez *Gastornis* (c), dont on a retrouvé plusieurs ossements de mandibule (d).

années est la stratégie de reproduction de ces oiseaux. En effet, jusqu'en 2013, aucune information n'existait à ce sujet. Aucun œuf d'oiseau fossile n'ayant pu être attribué de façon claire à *Gastornis*, il était impossible de savoir combien d'œufs étaient pondus par nid, ni si ces nids étaient enterrés ou déposés à même le sol, ou s'il existait des zones de ponte préférentielles où différents parents venaient pondre. Les réponses à ces questions ont été apportées grâce à la récolte de centaines de fragments de coquilles d'œuf dans le sud de la France et à leur attribution à *Gastornis* (voir l'encadré page ci-contre).

Des coquilles ornées

La très grande concentration de coquilles d'œufs sur différents sites tertiaires du sud de la France suggère que plusieurs pontes étaient rassemblées sur des sites communs, des sortes de lieux de ponte préférentiels sans doute choisis pour des raisons environnementales. D'après la répartition de ces sites, ces grands oiseaux vivaient probablement en groupe, au moins au moment de la reproduction, comme les autruches actuelles. De plus, aucun œuf n'a été retrouvé entier, contrairement aux nombreuses pontes de dinosaures constituées d'œufs entiers découvertes dans le Crétacé du sud de la France. Il est donc fort probable que les nids de

Gastornis aient été construits à même le sol, comme chez les autruches, et non enterrés comme ceux des dinosaures. Les œufs de *Gastornis* auraient alors été détruits avant la fossilisation par le piétinement ou les intempéries.

Enfin, l'ornementation de la surface des fragments de coquilles fournit aussi des renseignements sur la stratégie de ponte de ces oiseaux. Les fragments présentent des traces qui pourraient correspondre à un gradient d'usure de la coquille lors du frottement des œufs entre eux dans le nid, comme on l'observe à la surface des œufs d'autruches actuelles. Les nids devaient donc contenir plusieurs œufs.

Ainsi, les Gastornithidae, successeurs des grands dinosaures, n'étaient pas de terribles prédateurs, mais des oiseaux géants herbivores, se déplaçant plutôt lentement dans des environnements chauds et plus ou moins humides en fonction des régions (plutôt sec dans le sud de la France et plus humide dans le nord de l'Allemagne). Ces oiseaux se regroupaient dans des sites communs pour y pondre plusieurs œufs dans des nids construits à même le sol, sur un modèle proche de celui observé chez les autruches actuelles. Du scénario obsolète, il ne reste donc que le dénouement. *Gastornis* a probablement constitué une remarquable source de nourriture pour les mammifères carnivores qui montaient en puissance...

BIBLIOGRAPHIE

D. Angst et al., Fossil avian eggs from the Palaeogene of southern France: New size estimates and a possible taxonomic identification of the egg-layer, *Geological Magazine*, vol. 152, pp. 70-79, 2015.

D. Angst et al., Isotopic and anatomical evidence of an herbivorous diet in the Early Tertiary giant bird *Gastornis*. Implications for the structure of Paleocene terrestrial ecosystems, *Naturwissenschaften*, vol. 4, pp. 313-322, 2014.

E. Buffetaut et D. Angst, *Gastornis*: un mystérieux géant, *Espèces*, Hors-série n° 1, pp. 35-39, avril 2014.

D. Angst et E. Buffetaut, The first mandible of *Gastornis* Hébert, 1855 (Aves, Gastornithidae) from the Thanetian (Paleocene) of Mont-de-Berru (France). *Revue de Paléobiologie*, vol. 32, pp. 423-432, 2013.

La sélection de livres

POUR LA SCIENCE

IL Y A DES MILLIONS D'ANNÉES...

Découvrez notre sélection de titres pour vivre les découvertes et les enquêtes des scientifiques sur ce sujet passionnant : les stars de la paléontologie... et les oubliés !



**PRIX DU BEAU LIVRE
DE L'ACADEMIE DE MARINE**

Requins, de la préhistoire à nos jours

Gilles Cuny, Alain Bénétteau (illustr.)

C'est leur histoire, longue de plus de 400 millions d'années, que cet ouvrage vous propose de découvrir. Riche de plus de 150 reconstitutions originales, écrit par le spécialiste français des requins fossiles, cet ouvrage est un magnifique voyage dans le temps pour tous les passionnés des mondes disparus.

224 pages • 28.90 € • 978-2-7011-5423-7



La Terre avant les dinosaures

Sébastien Steyer, Alain Bénétteau (illustr.)

Ce livre braque l'objectif sur de grands oubliés de la paléontologie : des animaux qui, bien avant les dinosaures, peuplaient notre planète. Le lecteur est convié à un voyage dans le temps qui commence il y a environ 370 millions d'années. Pour les passionnés des mondes perdus !

208 pages • 26.90 € • 978-2-7011-4206-7



Le secret de l'archéobélodon

Alexandre Mille, Jean-Guy Michard et Pascal Tassy

C'est une enquête de près de deux siècles que ce livre propose. 1804, au Muséum national d'Histoire naturelle, Georges Cuvier tient entre ses mains une grosse molaire. Cent ans seront nécessaires pour reconstituer l'animal à qui appartenait cette molaire. Cent ans de plus seront nécessaires pour déterminer qui était vraiment le mastodonte, spectaculaire ancêtre de l'éléphant.

144 pages • 23 € • 978-2-7011-9298-7

En partenariat avec les éditeurs

Belin:
editions-belin.com


Le Pommier
editions-lepommier.fr

Tous ces livres sont
disponibles en librairie.