



P.-O. Antoine

6. LE CAMP DE BASE DE L'EXPÉDITION 1999, où l'équipe de paléontologues est restée en autosuffisance pendant près de trois semaines, était établi près du point d'eau de Lundo (flèches blanches à droite). Les terrains fossilifères – de la base de la falaise, au niveau du camp, jusqu'à l'horizon – s'échelonnent de l'Oligocène inférieur (environ 33 millions d'années) au Miocène supérieur (10 millions d'années). Ils reposent sur des calcaires marins blancs de l'Éocène.

niveaux stratigraphiques successifs. Certains caractérisent un milieu marin ou deltaïque. Le littoral de l'époque fourmillait de vie, avec de très nombreux sélaciens (requins et raies), dont on a retrouvé des dents par milliers. Ils nous ont notamment livré quelques restes de mammifères marins : des siréniens (groupe des lamantins et des dugongs) et des archéocètes. Les archéocètes sont des cétacés primitifs connus de l'Éocène au début du Miocène (50-20 millions d'années). Ils fréquentaient les eaux littorales chaudes du Pakistan, d'Égypte et d'Amérique du Nord. Ces animaux étaient déjà adaptés à la vie marine, comme l'indique leur corps allongé dépourvu de membres postérieurs visibles. Cependant, leur membre antérieur et leur denture n'étaient pas encore très spécialisés. À l'heure actuelle, le problème de l'origine des cétacés n'est toujours pas résolu : les anthracothères (groupe éteint, peut-être apparenté aux hippopotames) ou, plus probablement, les mésonychidés (groupe fossile) sont toutefois les candidats les plus sérieux.

Un véritable ossuaire

Au cours d'une prospection matinale, après une semaine de terrain, nous avons vu apparaître dans des ravines sableuses un amoncellement de fossiles. Le sol était jonché de restes

osseux gigantesques. Nous avons alors essayé de délimiter la zone fossilifère : celle-ci s'étendait sur des hectares et des hectares. Un bref examen des restes a suffi pour déterminer leur appartenance : un rhinocérotoïde géant, le baluchithère ! Des centaines d'éléments crâniens, dentaires et post-crâniens s'offraient à nous. Après tant de temps, nous avons vraisemblablement retrouvé le gisement original de *Paraceratherium* signalé par Pilgrim et Forster-Cooper au début du siècle.

Dans les collections du *Natural History Museum*, à Londres, les seuls spécimens signalés comme provenant de Chur Lando appartiennent au baluchithère, à l'exception de deux symphyses mandibulaires d'un autre rhinocérotoïde, *Chilotherium smithwoodwardi*. La faune associée à *Paraceratherium* dans les Bugti était donc inconnue, et le deuxième but de notre mission était de la découvrir.

Ces dépôts-là sont plutôt d'origine fluviale. Les animaux ont été emportés par une ou plusieurs crues, tandis que d'autres ont été la proie des prédateurs. Reconstituons l'environnement tropical et enchanteur où vivait le baluchithère : d'innombrables troncs de palmiers fossiles jonchent aujourd'hui le sol sableux, le plus souvent couchés (certains troncs dépassent les 10 mètres de long), mais parfois en place, avec les racines. Des

fruits fossilisés, proches de ceux des *Nipa* (palmiers actuels des mangroves de Malaisie), ont également été découverts. Là, les baluchithères côtoyaient d'autres rhinocéros de taille plus modeste, des ruminants, des suoidés (le groupe des sangliers et des pécaris) et des représentants de groupes aujourd'hui disparus, comme les schizothères (lointains cousins éteints des chevaux et des rhinocéros, munis de griffes) et les anthracothères. Les reptiles étaient présents, et bien présents puisque les sédiments regorgent de plaques dermiques de tortues (aquatiques et terrestres) et de crocodiles. La prédation semble d'ailleurs essentiellement avoir été le fait de ces derniers. Les restes en sont très abondants. Deux groupes sont présents dans les gisements de la région, avec des crocodiles géants, qui atteignaient environ 15 mètres de long (deux fois comme ceux du Nil), et des gavials de la taille de ceux du Gange (crocodiles piscivores actuels). Les restes attribuables à des mammifères prédateurs (carnivores et créodontes) sont en revanche rarissimes dans nos récoltes : quelques dents et os isolés seulement.

La faune de ce gisement indique dans son ensemble un âge oligocène (environ 28 millions d'années), bien antérieur à l'âge miocène classiquement admis pour les dépôts de la région (20 millions d'années). En outre, aucune espèce de cachet miocène n'a été découverte dans ces niveaux à baluchithères. Il faut monter de près de 50 mètres dans la série sédimentaire pour retrouver les premiers restes de mastodontes et autres dinotheres, typiquement miocènes. De ce fait, *Paraceratherium* n'a pas pu disparaître à cause de la compétition écologique avec les mastodontes, classiquement considérés comme leurs concurrents dans la même niche écologique : les baluchithères avaient disparu des collines bugti bien avant l'arrivée par dispersion des premiers mastodontes miocènes.

Un squelette reconstitué sur place

Depuis la mise au jour de quelques squelettes partiels de baluchithères, dans la première moitié du XX^e siècle, respectivement en Mongolie et au Kazakhstan, aucune découverte n'avait

permis de nouvelle reconstitution. Le premier squelette partiel, découvert à Hsanda Gol en Mongolie, a d'abord été attribué à *Baluchitherium grangeri* par les paléontologues américains Walter Granger et William Gregory en 1936, avant d'être rebaptisé *Indricotherium transouralicum*. Ces auteurs ont opéré une reconstitution graphique, d'après les quelques éléments associés d'un même individu et en extrapolant les dimensions des restes manquants. Cette reconstitution, souvent reproduite dans les manuels, est malheureusement erronée : le cou est trop court, les membres trop raides et les proportions du membre antérieur fortement mésestimées.

En revanche, un squelette d'*Indricotherium transouralicum* provenant de Chelkar Tennis, au Kazakhstan, complet à 40 pour cent, a été mieux traité : ce que nous avons pu observer au Pakistan est en effet bien plus proche de la reconstitution qu'en a proposée Vera Gromova en 1959. Le squelette complet est d'ailleurs exposé dans la galerie de paléontologie du Musée de l'Académie des sciences de Moscou. Enfin, le magnifique tableau de Zdenek Burian, exposé au Muséum de Prague depuis 1957, montre un groupe de baluchithères en train de manger le faite d'un arbre. L'allure générale est respectée, mais le membre antérieur est toutefois trop gracile.

Comme les restes crâniens, dentaires et du squelette appendiculaire étaient complètement désarticulés dans le gisement de Lundo Chur, nous avons décidé de récolter des spécimens afin de reconstituer un squelette composite de *Paraceratherium*. Puis nous sommes retournés à Dera Bugti, chargés d'une tonne d'ossements environ. Là, le squelette a été reconstitué, à même le sol, sur une bâche. Nous savons désormais que ces rhinocéros géants avaient en moyenne cinq mètres au garrot (5,5 mètres au musée), pour environ huit mètres de long. L'allure générale était plutôt celle d'un okapi très massif, avec une tête de cheval et une lèvre supérieure probablement préhensile (pour attraper les feuilles d'arbres composant leur régime alimentaire). Le dos est en pente, le membre antérieur beaucoup plus long et puissant que le membre postérieur. Quelques spécimens récoltés l'an dernier appartenaient manifestement à des individus plus grands encore, atteignant probablement jusqu'à six mètres au garrot

et neuf mètres de long. Un adulte moyen devait peser environ 15 à 20 tonnes.

La denture suit à la fois le schéma des tapirs et des rhinocéros : la denture antérieure (incisives et canines) est complètement développée, comme chez les tapirs, tandis que les molaires et les prémolaires ont des couronnes peu spécialisées, de type rhinocéros. On peut penser que leur régime alimentaire se composait de feuilles, de jeunes pousses et de branchages au faite des arbres.

Les restes mis au jour au cours de notre expédition correspondent à plus d'une vingtaine d'individus, allant du nouveau-né au vieillard. L'énorme variation de taille perceptible sur les restes de ce gisement avait le plus souvent été interprétée comme la preuve de la présence de plusieurs espèces de baluchithères associées (notamment Forster-Cooper, avec quatre espèces décrites successivement dans le seul gisement de Chur Lando : *Paraceratherium bugtiense*, *Thaumastotherium osborni*, *Baluchitherium osborni*, *Paraceratherium churlandensis*). Il nous semble beaucoup plus probable que ces différences soient en réalité l'expression de la variabilité individuelle. D'autre part, le dimorphisme sexuel, fondé notamment sur la taille comme chez la plupart des grands mammifères herbivores fossiles et actuels, contribue certainement à cette variabilité.

Des prédateurs à la mesure de leurs victimes

De nombreux os d'herbivores portent des empreintes coniques à leur sur-

face. Celles-ci correspondent aux traces laissées par des dents de crocodiles. Même les baluchithères, qu'on imagine invulnérables en raison de leur corpulence, n'ont pas été épargnés. Il faut dire que ces mammifères géants avaient des prédateurs géants : des crocodiles d'une quinzaine de mètres de long, deux fois comme ceux du Nil ! D'autres os ont manifestement séjourné dans des estomacs. Leur aspect poli, corrodé, est caractéristique de l'attaque acide des sucs gastriques.

Si l'on sait ce que mangeaient les crocodiles, qu'en est-il des herbivores ? Un moyen simple existe, qui consiste à récolter les excréments fossiles, les coprolithes. Un traitement chimique permet de dissoudre le phosphate de calcium des coprolithes et de ne conserver que les spores et les pollens. Ceux-ci indiquent les mets préférés des herbivores, ainsi que les essences de la région. Même les coprolithes des carnivores contiennent, en plus faible concentration, des spores et des pollens issus de leur environnement, et aussi de l'estomac de leurs victimes... Les coprolithes ne sont pas toujours attribuables à un groupe animal précis, mais dans le cas des baluchithères, c'est différent : le critère de taille est de poids ! Les plus grands mammifères terrestres ayant jamais vécu ont également produit les plus gros coprolithes.

L'extinction de ces géants paraît intimement liée aux changements environnementaux intervenus à la fin de l'Oligocène et auxquels ils n'ont pu s'adapter assez vite. Nul besoin d'une pluie d'astéroïdes quand la nourriture vient à manquer !

Jean-Loup WELCOMME est correspondant du Muséum national d'histoire naturelle à Paris. Pierre-Olivier ANTOINE est étudiant au Muséum national d'histoire naturelle à Paris. Laurent MARIVAUX est étudiant à l'Institut des sciences de l'évolution de l'Université de Montpellier

C. FORSTER-COOPER, *Paraceratherium bugtiense*, a new genus of *Rhinocerotidae* from the Bugti Hills of Baluchistan. Preliminary notice, in *Annual Magazine of Natural History*, vol. 8, pp. 711-716, 1911.

W. GRANGER et W. GREGORY, *Further Notes on the Gigantic Extinct Rhinoceros, Baluchitherium...*, in *Bulletin of the American Museum of Natural History*, vol. 72, pp. 1-71, 1936.

V. GROMOVA, *Rhinocéros gigantesques*, Travaux de l'Institut paléontologique de l'Académie des sciences de l'URSS, vol. 71, pp. 1-164, 1959 (en russe).

S. MATHESON, *The Tigers of Baluchistan*, 2^e édition, Oxford University Press (Karachi), 213 pages, 1997.

J.-L. WELCOMME et al., *Nouvelles découvertes de Vertébrés miocènes dans le synclinal de Dera Bugti (Balouchistan, Pakistan)*, in *CRAS, Sciences de la Terre et des planètes*, vol. 325, pp. 531-536, 1997.

J.-L. WELCOMME et L. GINSBURG, *Mise en évidence de l'Oligocène sur le territoire des Bugti (Balouchistan, Pakistan)*, *CRAS, Sciences de la Terre et des Planètes*, vol. 325, pp. 999-1004, 1997.

Des solides coulants

PHILIPPE COUSSOT • HENRI VAN DAMME • CHRISTOPHE ANCEY

Dans l'écoulement des pâtes granulaires, comme le béton frais, la viscosité peut varier brusquement. La répartition du liquide et l'évolution des contacts entre les grains expliquent ce comportement étrange.

Les sables mouvants de la Loire ne rendent pas leur proie...

Balzac

Les sables mouvants, ceux de la Loire ou de la baie du Mont-Saint-Michel, sont un mélange de sable et d'eau qui engloutissent lentement les objets déposés à leur surface. De tels mélanges ne se comportent ni comme du sable, ni comme de l'eau, mais comme des pâtes qui s'écoulent différemment des liquides. Longtemps, l'étude des pâtes a été négligée ; pourtant, les pâtes sont omniprésentes dans la nature et dans l'industrie : mousse à raser, béton frais, pâte à modeler, mayonnaise ou coulées de cendres sur les flancs des volcans.

Si les caractéristiques des écoulements de pâtes diffèrent selon le matériau, leurs propriétés mécaniques résultent de leur constitution commune : le mélange d'un liquide et de très nombreux grains mous ou durs. Ces grains peuvent être des particules solides (suspension), des bulles (mousse) ou des gouttelettes (émulsion). Lorsque le nombre des grains est faible, le comportement est analogue à celui d'un liquide. En revanche, nous verrons qu'à mesure que le nombre de grains augmente, le comportement se modifie et devient inhabituel : les grains se gênent mutuellement au cours des déformations imposées au mélange.

Les écoulements de pâtes granulaires peuvent être dévastateurs, telles les coulées de boues, charriant blocs de rochers, graviers et particules argileuses. Les laves volcaniques, où se forment un grand nombre de cristaux lors des changements de température ou de pression, ont des comportements similaires. Les coulées de

cendres volcaniques (lahars) sur le flanc des volcans s'écoulent parfois sur de grandes distances (voir la figure 1).

Tous les écoulements de pâtes granulaires ne sont pas catastrophiques. Ces matériaux sont très utiles dans l'industrie quand il s'agit de mélanger, de mettre en forme un produit ou d'obtenir des écoulements particuliers. La maîtrise des effets mécaniques de l'entassement des grains est alors un enjeu crucial. Comment faire pour que la mousse à raser reste fixée sur le visage de l'utilisateur ? Comment obtenir un béton qui reste liquide lors de l'injection, mais suffisamment résistant après sa prise ? Comment faire pour qu'un bonhomme en pâte à modeler ne s'effondre pas sur lui-même et qu'il ne se casse pas non plus lorsque l'on cherche à le remodeler ? Quelle doit être la viscosité de la mayonnaise pour qu'elle sorte facilement du tube, mais reste figée dans l'assiette ?

La connaissance du comportement de ces matériaux est ainsi doublement importante : pour la prévention des risques naturels et pour l'optimisation des processus industriels. Longtemps négligée, l'étude des pâtes granulaires gagne du terrain depuis que les physiciens ont compris que leur compréhension était au confluent de plusieurs disciplines : mécanique des sols, mécanique des fluides complexes et physique des milieux hétérogènes.

Après avoir examiné comment varie la viscosité d'une pâte en fonction du nombre de grains qu'elle contient, nous verrons que, pour décrire des pâtes très concentrées, il faut tenir compte des contacts entre les grains et du mouvement du fluide interstitiel ; plus précisément, de la configuration des particules, de la

manière dont se transmettent les forces au sein du milieu granulaire, des effets de la migration du liquide entre les grains et de l'éventuelle fracturation de la pâte. Grâce à ces progrès, les physiciens prédisent l'écoulement de ces matériaux dont les brusques variations de viscosité étaient incomprises.

Dans tout ce qui suit, on considérera que les grains dans le liquide sont relativement gros (plus de quelques micromètres), de sorte que ces grains ne sont pas tributaires de l'agitation thermique des molécules du liquide. Cela signifie aussi que deux particules qui s'approchent ne tendent ni à s'agréger en raison des forces attractives à courte distance, dites de Van der Waals, qui agissent sur des petites particules, ni à se repousser sous l'effet des forces électrostatiques qui résultent de la diffusion d'ions initialement adsorbés à la surface des particules. Nous traiterons uniquement des pâtes granulaires où le phénomène essentiel est un encombrement lié à la taille réelle des particules.

Visqueux jusqu'au blocage

Plus un liquide est visqueux, plus il s'écoule lentement. Ainsi, le miel est plus visqueux que l'huile, elle-même plus visqueuse que l'eau. Peut-on définir une viscosité pour nos pâtes ? Si le volume des grains placés dans le liquide est bien inférieur à celui du liquide, sa viscosité moyenne n'est guère différente de celle du liquide seul. En 1905, Albert Einstein a montré que la différence relative de viscosité du mélange par rapport à celle du liquide vaut 2,5 fois la concentration volumique des grains, c'est-à-dire le rapport du volume occupé par les grains et du volume total du mélange.