

Bmp2. Sans arrêt, ces deux protéines contrôlent tous les stades qui se succèdent à mesure que se déploie la plume.

Ces résultats de biologie moléculaire confirment que le développement se décompose bien en une succession de stades, où chacun dépend du précédent. Ainsi, l'expression alternée des protéines Shh et Bmp2 n'a lieu qu'après le développement du germe des plumes tubulaires. De même, les variations des motifs d'expression de ces protéines pendant la croissance des plumes de contour ne sont possibles qu'après la formation des ébauches des barbes longitudinales. Ainsi, les résultats de l'étude moléculaire confortent notre modèle de développement des plumes, passant d'un long tube creux à une touffe duveteuse de barbes, pour acquérir la structure des plumes de contour.

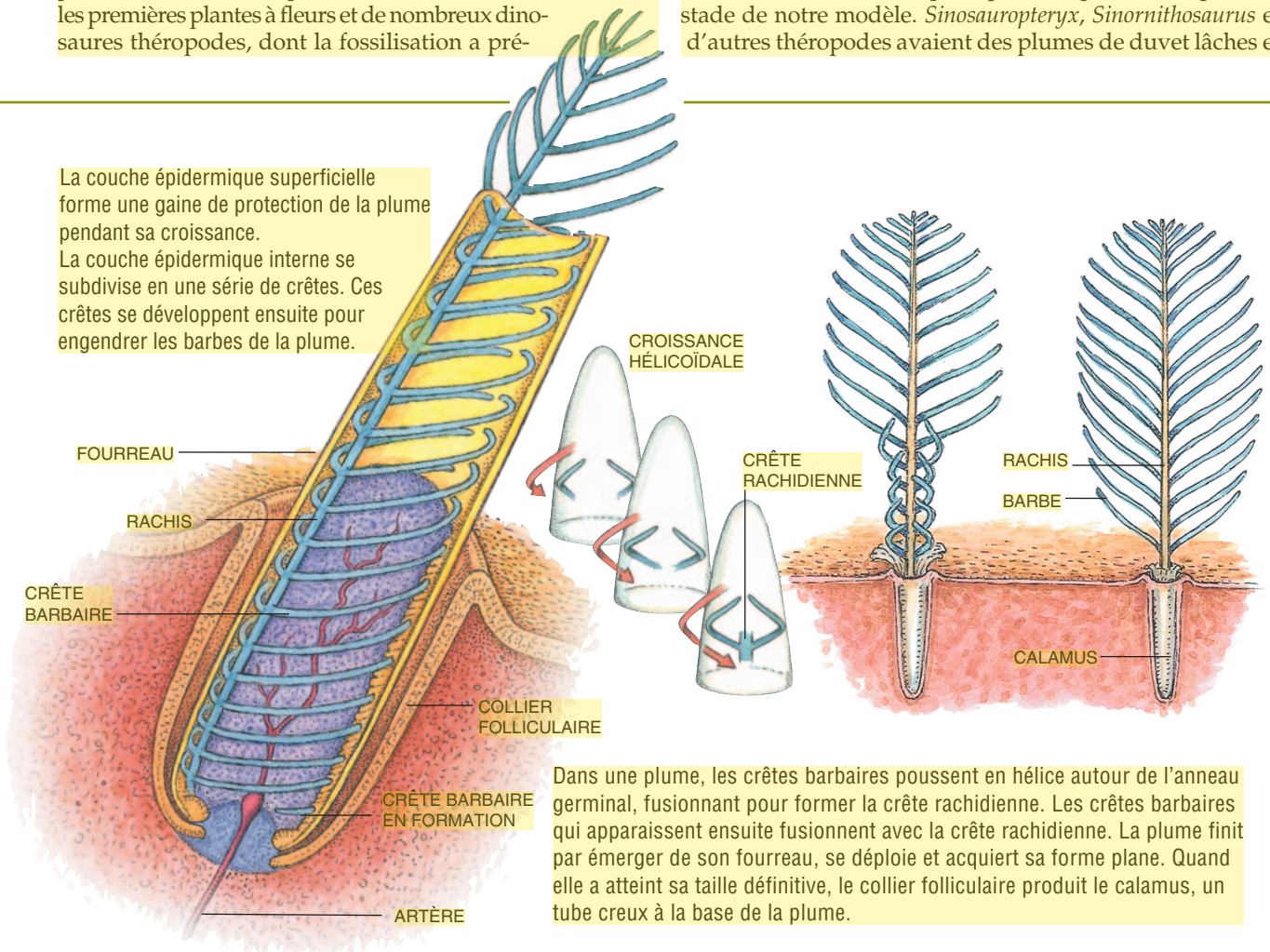
Fossiles à plumes

Jusqu'à présent, nous n'avons évoqué que notre modèle de développement et les résultats fournis par la biologie moléculaire. Il nous reste à confronter ces résultats à l'observation des fossiles. Plusieurs sites du Nord de la Chine ont livré des fossiles de dinosaures à plumes dont les restes semblent valider notre théorie. Une équipe de paléontologues chinois a ainsi fouillé plusieurs gisements du Crétacé inférieur (datant de 128 à 124 millions d'années) dans la formation géologique Yixian. Des conditions favorables ont assuré une remarquable conservation de nombreux organismes, par exemple les premiers mammifères placentaires, des oiseaux anciens, les premières plantes à fleurs et de nombreux dinosaures théropodes, dont la fossilisation a pré-

servé beaucoup de détails. Parmi ces dinosaures, certains portent des plumes primitives, mais d'autres ont des plumes tout à fait « modernes ». Nous en déduisons que les plumes sont apparues chez des dinosaures carnivores bipèdes et terrestres et ont acquis les caractéristiques des plumes modernes, bien avant que n'apparaissent les oiseaux et le vol.

Le premier fossile découvert dans cette formation est celui de *Sinosauropteryx*, mis au jour en 1997. Il s'agit d'un coelurosaur de la taille d'un poulet dont l'épiderme portait de petites structures tubulaires, peut-être ramifiées. Puis on a découvert un oviraptor *Caudipteryx* de la taille d'une dinde. Il avait, à l'extrémité de ses membres antérieurs, des plumes de contour d'apparence moderne, qui sont bien conservées. Certains pensent que *Caudipteryx* était en fait un oiseau coureur et pas un dinosaure, mais les analyses phylogénétiques le placent parmi les théropodes. Les paléontologues ont aussi mis au jour des fossiles de dromaeosaures, des dinosaures que l'on suppose avoir été proches des oiseaux, mais qui à l'évidence n'en étaient pas. Ces théropodes portaient aussi des plumes de contour. Ainsi, plus d'une dizaine de dinosaures théropodes portant des plumes, mais qui n'étaient pas des oiseaux, ont été découverts, parmi lesquels, *Beipiaosaurus* de la taille d'une autruche et plusieurs dromaeosaures, dont *Microraptor* et *Sinornithosaurus*.

L'hétérogénéité des plumes portées par ces dinosaures conforte la théorie développementale. Les plumes les plus primitives connues – celles de *Sinosauropteryx* – sont des structures tubulaires simples, qui correspondent au premier stade de notre modèle. *Sinosauropteryx*, *Sinornithosaurus* et d'autres théropodes avaient des plumes de duvet lâches et



dépourvues de rachis, correspondant parfaitement au deuxième stade de notre modèle. Les plumes de contour avaient des barbules différenciées constituant une surface plane, comme dans le quatrième stade. Notons aussi que *Caudipteryx*, *Protopteryx* et les dromaeosaures avaient un « éventail » de plumes à l'extrémité de leur queue, ce qui indique que certains aspects du plumage des oiseaux modernes étaient déjà présents chez les théropodes.

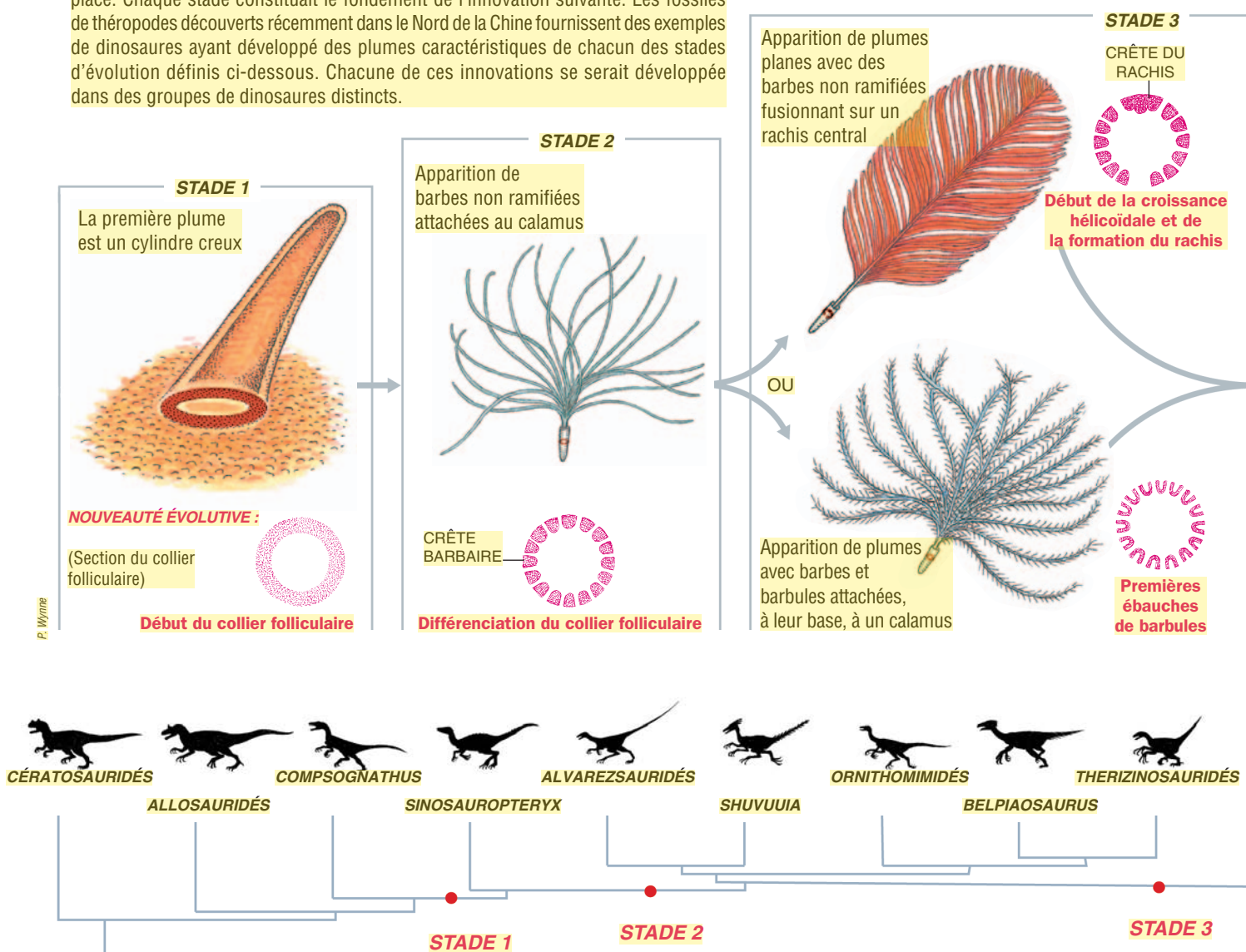
Une nouvelle histoire évolutive de la plume se dessine depuis la découverte de ces fossiles. Nous pensons que les plumes sont apparues dans un groupe de théropodes, puis s'y différencièrent jusqu'à atteindre une diversité comparable à celle des plumes contemporaines, tout cela bien avant l'apparition des oiseaux. Ensuite, un groupe particulier de ces dinosaures à plumes développa une aptitude au vol à l'aide des plumes de contour des membres antérieurs et de la queue, donnant les oiseaux.

Le nouveau registre fossile chinois implique aussi qu'il faut redéfinir ce qu'est un oiseau, et il renouvelle notre approche de la biologie et du développement des théropodes. Les oiseaux, c'est-à-dire toutes les espèces qui descendent du plus récent ancêtre commun à Archéoptéryx et aux oiseaux modernes, étaient considérés comme des vertébrés à plumes et volants. Aujourd'hui, nous devons les considérer plutôt comme les descendants d'un groupe de théropodes à plumes qui ont acquis la capacité de voler. Ainsi, les nouveaux fossiles ont encore réduit la différence entre les oiseaux et les dinosaures : la définition des oiseaux est encore plus difficile à établir. Qui plus est, les plus célèbres des théropodes, *Tyrannosaurus* ou *Veliciraptor*, étaient peut-être couverts de plumes, mais n'étaient pas des oiseaux !

Aujourd'hui, on peut revoir les anciennes hypothèses à la lumière des découvertes récentes. Qu'en est-il de

L'évolution des plumes

Ce modèle est fondé sur le fait que les mécanismes de développement d'un organisme reflètent la façon dont cet organisme a évolué. Ainsi, les plumes ont acquis leurs caractéristiques en passant par plusieurs stades au cours desquels une innovation évolutive s'est mise en place. Chaque stade constituait le fondement de l'innovation suivante. Les fossiles de théropodes découverts récemment dans le Nord de la Chine fournissent des exemples de dinosaures ayant développé des plumes caractéristiques de chacun des stades d'évolution définis ci-dessous. Chacune de ces innovations se serait développée dans des groupes de dinosaures distincts.



l'hypothèse selon laquelle les écailles des reptiles auraient évolué pour donner les plumes ? Les résultats de la biologie du développement la mettent à mal. Selon cette hypothèse, les écailles sont devenues des plumes en s'allongeant, puis en développant des bords dont les franges se subdivisèrent ensuite en barbules à sillon et à crochets. Or, comme nous l'avons évoqué, les plumes se forment à partir d'un tube et s'aplanissent seulement après être sorties du tube. En revanche, les deux faces planes d'une écaille se développent à partir du sommet et de la base de l'excroissance épidermique initiale qui forme cette écaille.

Les résultats que nous avons exposés mettent également à mal la théorie selon laquelle les plumes se développent pour permettre le vol. Seules les plumes très évoluées – c'est-à-dire les plumes asymétriques comportant une surface plane serrée (stade 5) – rendent le vol possible. En fait, prétendre que les plumes se sont développées pour le

vol est un peu comme affirmer que les doigts de la main sont une invention de l'évolution pour rendre possible la pratique du piano. Les plumes ont plutôt été exploitées pour leurs propriétés aérodynamiques après l'apparition d'une grande variété de structures. Elles ont d'abord évolué pour remplir des objectifs qui n'étaient pas liés au vol, puis ont été utilisées à d'autres fins.

La fonction des plumes primitives

À quoi servaient les plumes avant le vol ? On a proposé que la fonction originelle du plumage a été l'isolation thermique, la protection contre la pluie, un atout pour la parade nuptiale, ou encore un camouflage pour se défendre. Malgré la richesse du nouveau registre fossile de théropodes à plumes, on ne saura sans doute jamais laquelle de ces hypothèses est la bonne. Pour notre part, nous pensons que les

