

> gènes de développement, tel le gène *Sox9*, dont le produit contrôle l'expression spécifique du gène de collagène de type II dans les chondrocytes, les cellules du cartilage. Seules les cellules exprimant *Sox9* produisent cette protéine. L'équipe a ainsi découvert que le plan de la main de l'embryon est bien plus complet que celui de l'adulte. Prenons le cas de l'aile de l'autruche. On distingue non pas trois ébauches cartilagineuses exprimant *Sox9*, mais cinq. Puis les ébauches des doigts I (le pouce, ou doigt le plus antérieur) et V (le plus postérieur) régressent, et seules les ébauches II, III et IV iront à terme. En d'autres termes, l'expression de *Sox9* peut persister alors que les doigts correspondants sont perdus.

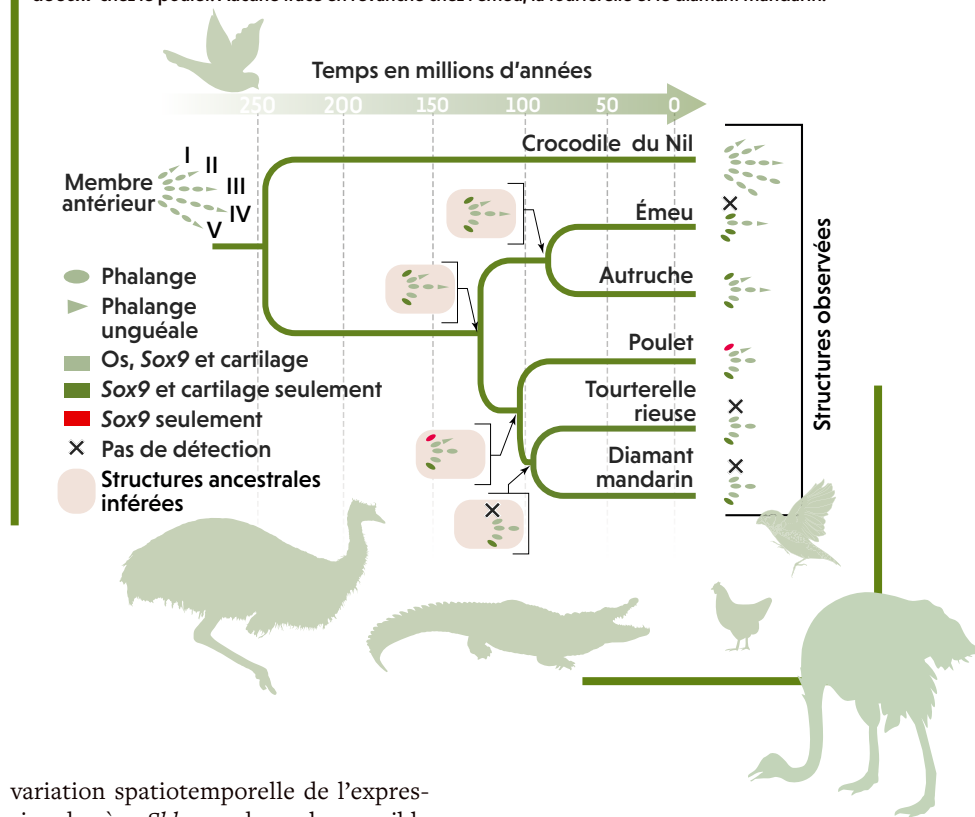
Focalisons-nous sur les doigts V et I. Tous les oiseaux adultes ont perdu le doigt V. Néanmoins, tous les embryons développent, à sa position, une ébauche transitoire exprimant *Sox9*, qui évolue en cartilage. Cela est également vrai pour le membre postérieur, et, si l'on se réfère à la phylogénie et la paléontologie, les voies génétiques du développement du cartilage du doigt V ont persisté pendant plus de 25 millions d'années après que le doigt V a disparu de la patte postérieure. Le doigt I, lui, a disparu de toutes les ailes depuis 120 millions d'années. Mais les voies génétiques sous-jacentes parfois aussi, et ce dans deux lignées indépendantes (les oiseaux coureurs et les oiseaux volants). Comment expliquer une telle différence ?

UNE CONTRAINTÉ DÉVELOPPEMENTALE

D'un point de vue embryologique, les doigts I et V ne sont pas en situation identique. En effet, le bourgeon du membre présente, dans sa partie postérieure, une aire appelée « zone d'activité polarisante » ou ZPA, qui envoie les signaux permettant à ce dernier de se développer suivant un axe antéropostérieur. Ainsi, le doigt V est proche de la ZPA, le doigt I en est le plus éloigné. Or la ZPA exprime le gène *Shh*, dont le produit est une protéine « morphogène » : elle diffuse dans les tissus et, selon sa concentration, active des cellules en activant *Sox9*. Cette voie est très conservée, l'évolution ne jouant que sur le caractère spatiotemporel de l'expression. Or, par diffusion, la protéine se retrouve en grande concentration près de la ZPA, donc vers le doigt V, et en faible concentration dans la partie antérieure du bourgeon, où seront situées les ébauches des doigts I et II. Une légère

QUAND LES DOIGTS DES OISEAUX ONT DISPARU

En combinant observations, phylogénie et paléontologie, l'équipe de Michael Richardson a reconstitué l'évolution des pertes de doigts de l'aile. Tous les oiseaux adultes ont perdu le doigt V, mais leurs embryons (ci-dessous la structure des mains au stade final du développement) en développent une ébauche transitoire exprimant le gène *Sox9* et produisant du cartilage. Le doigt I, lui, est représenté par un cartilage diffus chez l'autruche et une faible expression de *Sox9* chez le poulet. Aucune trace en revanche chez l'émeu, la tourterelle et le diamant mandarin.



variation spatiotemporelle de l'expression du gène *Shh* sera donc plus sensible dans les endroits les plus éloignés de la ZPA. En d'autres termes, les contraintes développementales ne sont pas les mêmes pour une ébauche proche ou éloignée de la ZPA.

Ainsi, la disparition des doigts des oiseaux se fait suivant deux pressions : une contrainte développementale et une sélection liée aux fonctions. Il est vraisemblable que la disparition du doigt chez *O. avarsan* relève d'un scénario analogue. En effet, on peut postuler que la pression de sélection sur les pattes antérieures se relâche, étant donné que la présence de doigts griffus ne paraît plus indispensable pour un animal qui n'a plus de proies à saisir. Mais est-ce le même mécanisme que celui décrit pour les oiseaux ? Vu la proximité évolutive des animaux, un biologiste postulera une identité des mécanismes évolutifs, ce qu'on appelle « un parallélisme ». Mais comment le démontrer ? Nous touchons la limite de la paléontologie. ■

BIBLIOGRAPHIE

G. F. Funston et al., **A new two-fingered dinosaur sheds light on the radiation of Oviraptorosauria**, *R. Soc. Open Sci.*, vol. 7(10), article 201184, 2020.

K. Kawahata et al., **Evolution of the avian digital pattern**, *Scientific Reports*, vol. 9, article 8560, 2019.

M. A. G. de Bakker et al., **Digit loss in archosaur evolution and the interplay between selection and constraints**, *Nature*, vol. 500, pp. 445-448, 2013.

L'UNIVERS AVANT LE BIG BANG

- 7 dossiers rédigés par des chercheurs et des experts sur le sujet
- Une lecture adaptée sur écrans

3,99 €



Les *Thema* sont une collection de hors-séries numériques. Chaque numéro contient une sélection des meilleurs articles publiés dans *Pour la Science* sur une thématique.

Dans la collection *Thema* découvrez aussi



**Commandez et téléchargez
les numéros en pdf**



Pour lire votre numéro, rendez-vous dans votre compte client



boutique.pourlascience.fr/tous-les-numeros/thema.html

L'AUTEUR



HERVÉ THIS
physicochimiste,
directeur du Centre
international
de gastronomie moléculaire
AgroParisTech-Inra, à Paris

VARIATIONS SUR MOUSSES EN BULLE MAJEURE

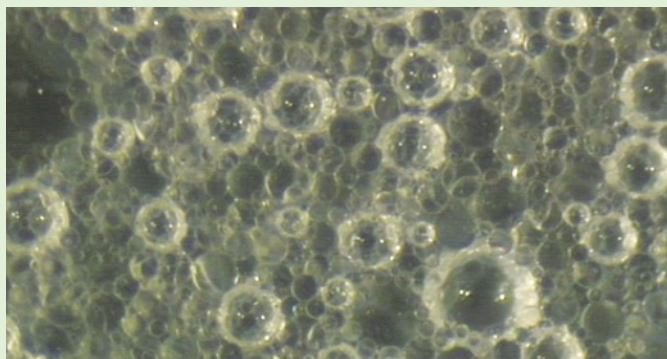
Au lieu de subir le résultat des actions culinaires, soyons plus créatifs en choisissant les tailles des particules d'une suspension ou des bulles d'une mousse, leur consistance, la viscosité du liquide utilisé...

La cuisine est restée rustique. On continue de préparer des mets comme au Moyen Âge (les sauces rémoulades, les bouillons...), ou même comme bien avant: les rôtis et les bouillons datent presque de l'introduction du feu! Faisons progresser l'art culinaire en y introduisant plus de précision et en adaptant l'activité culinaire à nos objectifs. Les recettes de cuisine ne mentionnent pas d'objectif et se contentent d'indiquer un protocole que l'on est censé suivre à la lettre, avec le risque de ne jamais pouvoir se rattraper en cas de problème. Or les problèmes sont nombreux, tant les ingrédients classiques (fruits, légumes, farines, etc.) sont variables selon les lots, les saisons...

Considérons par exemple une simple mousse. La photographie ci-contre est celle d'une mousse produite par des techniques de microfluidique et qui présente de grosses bulles d'air entourées de petites bulles d'air satellites. On peut se demander si la texture de cette mousse est différente de celle d'une mousse dite «monodisperse», dont toutes les bulles seraient de la même taille. Si l'on cuit cette mousse comme une meringue, aurons-nous des objets d'un type culinaire nouveau? Je vous invite à faire l'expérience, en mêlant deux mousses de blanc en neige, l'une sucrée (petites bulles), et l'autre pas (grosses bulles).

On peut faire le même type d'observations pour des «suspensions», qui sont le thème du neuvième concours international de «cuisine note à note». Par suspension, on entend une dispersion, classiquement aléatoire, de particules solides, dans un liquide pour les suspensions liquides, et dans un solide pour les suspensions solides (pensons à du nougat, avec des éclats d'amande dans un caramel). Là encore, la pratique est

Dans cette mousse, les bulles d'air ont différentes tailles. Le diamètre des plus grosses est ici de 0,01 millimètre. La répartition en tailles des bulles d'une mousse alimentaire a une influence sur la perception en bouche.



généralement très rudimentaire, puisque les systèmes colloïdaux classiques s'obtiennent par un mélange sans précaution (dans une mayonnaise, les gouttes d'huile dont dispersées de façon aléatoire). Pour des breuvages épaissis, tels les frappés aux fruits, on peut faire mieux que simplement broyer ces derniers: pourquoi ne pas séparer les fibres (de la cellulose, principalement), puis les remettre après en avoir broyé la moitié dans un moulin à café, afin d'en obtenir de plus petites?

On peut aussi jouer sur la consistance des objets dispersés. On sait que des particules solides sont perceptibles en bouche quand leur diamètre dépasse une quinzaine de micromètres. Mais cette limite ne vaut plus quand les objets sont plus mous, comme pour la purée de pomme, où l'on disperse des agrégats de cellules, des cellules ou des cellules ouvertes et vidées de leur contenu: on ne perçoit alors que des particules bien plus grosses.

En outre, les études du chocolat, par exemple, ont montré que, pour des systèmes complexes, la répartition en tailles des particules dispersées est un facteur clé. Bien sûr, ce sont les particules les plus grosses que l'on perçoit le mieux, mais, quand des particules de différentes tailles sont présentes en suspension, ce sont les 10% des particules les plus grosses qui sont le mieux corrélées avec la perception sensorielle, comme l'ont récemment

montré Heather Shewan, de l'université du Queensland, et deux collègues (*Food Hydrocolloids*, vol. 103, 105662, 2020).

Pour cette perception du granuleux, la concentration des particules est également importante, tout comme la viscosité de la phase liquide dispersante. Un liquide visqueux masque en effet ce granuleux, dont il s'ensuit une libération prolongée des composés qui se dissoudront dans la salive, quand les solides dispersés sont hydrosolubles.

Répartition en tailles et consistance des particules dispersées, viscosité du liquide dispersant: autant de facteurs qui, maîtrisés, détermineront le goût du mets. ■



LA RECETTE

- 1 À l'extracteur de jus, préparer un jus de carottes. Y ajouter de la vitamine C.
- 2 Stocker au frais.
- 3 Récupérer le résidu solide, constitué essentiellement de fibres de cellulose, et le mettre à four très doux (60 °C, par exemple) pour le sécher.
- 4 Passer la moitié de ces fibres sèches au moulin à café, afin d'obtenir une poudre très fine.
- 5 Puis mettre les deux moitiés, non broyées et broyées, dans le jus de carotte. Mélanger et servir.