

dix mille fois plus visqueux que l'eau -, il est difficile de créer de la turbulence. Qu'à cela ne tienne: on peut effectuer un «mélange chaotique», l'exemple le plus simple étant celui de la «transformation du boulanger» (voir l'encadré page 89). Le chaos est caractérisé par une évolution parfaitement déterministe, mais très sensible aux conditions initiales, de telle sorte que deux éléments de volume très proches peuvent se retrouver très distants à la fin de la transformation. Un mélange chaotique emplit ainsi de façon homogène tout le volume avec les deux fluides.

En pratique, on peut facilement réaliser ce type de transformation dans des tuyaux à l'aide de mélangeurs dépourvus de pièces mobiles. Les deux fluides sont injectés à l'entrée; puis des cloisons successives séparent, étirent et recombinaient les écoulements pour obtenir, à la sortie, un mélange bien homogène. Dans un récipient, vous pouvez obtenir un résultat analogue à celui de la transformation du boulanger en faisant des 8 avec votre cuillère, par exemple pour mélanger de la pâte fluide à du chocolat fondu.

CISAILLER ÉNERGIQUEMENT

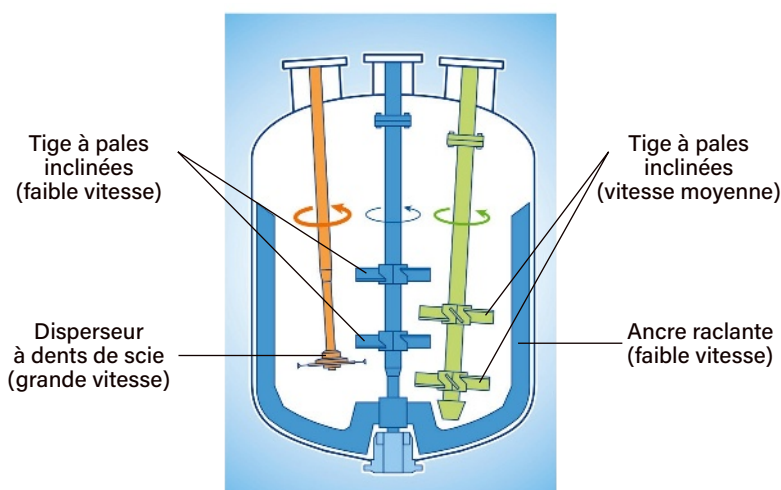
L'histoire est-elle finie? Hélas non. Lorsque les fluides à mélanger ont des viscosités très différentes, du miel dans du thé par exemple, la cuillère ne suffit pas. Son principal effet est de déplacer le miel en bloc dans de l'eau tourbillonnante. Pourquoi? Parce que pour une même contrainte, la vitesse de cisaillement est inversement proportionnelle à la viscosité. Par conséquent, si l'on veut déformer notablement le miel, il est nécessaire d'appliquer des forces très importantes ou, ce qui est équivalent, donner une très grande vitesse à l'eau.

L'agitation manuelle à la petite cuillère ne le permet pas et il faut recourir à un fouet mécanique ou à un blender. Quant aux mélangeurs industriels, ce sont souvent des dispositifs comportant plusieurs éléments mobiles qui agissent chacun à une échelle différente (voir l'encadré ci-dessus). Un premier dispositif opère à l'échelle du récipient entier, afin que les fluides ne restent pas immobiles à proximité des parois. Un deuxième porte sur l'homogénéisation moyenne à des échelles intermédiaires et, enfin, un troisième dispositif agit aux petites échelles pour briser les éventuels morceaux homogènes trop visqueux...

Dans tous les cas, il faut se résoudre à fournir de l'énergie, beaucoup d'énergie, car qui dit cisaillement dit dissipation

HOMOGÉNÉISER AUX DIFFÉRENTES ÉCHELLES

Les mélangeurs industriels sont de conceptions très variées. Dans le type de mélangeur schématisé ici, un premier dispositif (en bleu) à rotation lente assure un mélange grossier, à grande échelle. Un deuxième (en vert), qui tourne à moyenne vitesse, permet de mélanger plus finement, à une échelle intermédiaire. Enfin, le troisième (en orange) tourne à grande vitesse et ses dents de scie effectuent un mélange à petite échelle. Et à l'échelle microscopique, c'est la diffusion moléculaire qui fait son œuvre.



d'énergie à cause de la viscosité. C'est d'ailleurs pourquoi il faut ajouter l'eau dans le sirop et non l'inverse. Détaillons cela.

Lorsqu'on verse un liquide dans un récipient qui en contient déjà un autre, l'énergie apportée est l'énergie cinétique du fluide versé lorsqu'il arrive au niveau de la surface du fluide déjà présent. Si l'on diminue au maximum la vitesse de versement, par exemple en opérant très près de la surface ou délicatement le long d'une paroi ou d'un objet qui ralentit la chute, on parvient à superposer deux fluides *a priori* miscibles sans qu'ils ne se mélangent, l'énergie apportée étant minime.

Maintenant, supposons que l'on veuille mélanger une mesure de sirop ou de pastis à neuf mesures d'eau, en versant les boissons d'une hauteur égale à la moitié de la hauteur du verre. L'énergie disponible pour le mélange est 15 fois supérieure si l'on verse l'eau en second que si on la verse en premier: les 9 volumes d'eau mettent facilement en mouvement turbulent le volume de sirop ou de pastis, alors que le contraire ne se produit pas. Et c'est sans tenir compte des différences de masse volumique et de viscosité, qui constituent elles aussi des freins au mélange par simple ajout. ■

BIBLIOGRAPHIE

D. S. Dickey, **Tackling difficult mixing problems**, *Chemical Engineering Progress*, vol. 111(8), pp. 35-42, 2015.

A. L. Ventresca et al., **The influence of viscosity ratio on mixing effectiveness in a two-fluid laminar motionless mixer**, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 80(4), pp. 614-621, 2002.

J. Villermaux, **The role of energy dissipation in contacting and mixing devices**, *Chemical Engineering & Technology*, vol. 11(1), pp. 276-287, 1988.

La grenadine parfaite, vidéo de Merci la Physique : <https://www.youtube.com/watch?v=FZ62nDv19nc>

L'AUTEUR



HERVÉ LE GUYADER
professeur émérite
de biologie évolutive
à Sorbonne Université,
à Paris

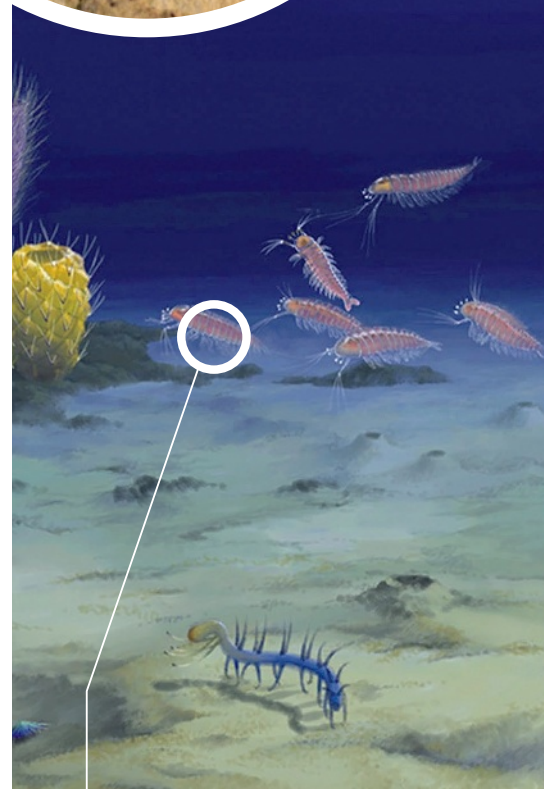
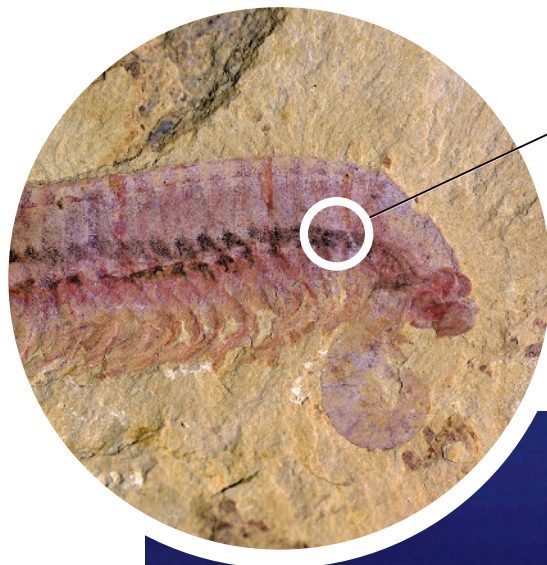
LES CREVETTES À POIGNE DU CAMBRIEN

Mâchoires, antennes, crochets... : les arthropodes actuels présentent sur leur tête des appendices particuliers. Un nouveau fossile du Cambrien apporte des lumières sur leur origine.

En 1886, mandaté par la commission géologique du Canada, le géologue Richard McConnell partit établir la carte géologique des abords du tout nouveau chemin de fer canadien du Pacifique. Près du village de Field, il apprit qu'un cheminot avait trouvé des «insectes de pierre» sur le mont Stephen, à 500 mètres de là. Il grimpa donc à son tour sur la montagne et en rapporta nombre de fossiles de trilobites, ainsi que deux fragments étranges ressemblant à des crevettes (ce gisement sera connu plus tard comme celui des «schistes de Burgess»). D'autres morceaux furent découverts ensuite et deux paléontologues, Joseph Whiteaves en 1892, puis Charles Walcott en 1911, se risquèrent à décrire l'animal, dénommé *Anomalocaris canadensis* (crevette anormale du

Canada). Mais celui-ci semblait insaisissable : selon les parties que l'on regardait, on y voyait une méduse, un concombre de mer, un ver polychète ou des appendices d'autres arthropodes !

Il a fallu attendre le paléontologue britannique Harry Whittington et son doctorant irlandais Derek Briggs pour avoir, en 1985, une description raisonnable de ce qui s'est révélé un imposant carnivore des mers du Cambrien, il y a entre 540 et 485 millions d'années. Le corps de l'animal, d'environ 1 mètre de long, est segmenté, comme celui d'une crevette ou d'un insecte. Les segments centraux portent de part et d'autre des palettes qui l'aidaient à nager par ondulation du corps. Deux appendices antérieurs segmentés devaient servir à saisir ses proies (des trilobites, par exemple).



Avec leur exosquelette souvent calcifié, les arthropodes se fossilisent facilement. Ainsi, de très nombreux taxons éteints ont été décrits, certains contemporains de *K. zhangii*, comme *Anomalocaris* (en haut à droite), des trilobites (à droite) et des limules (en bas à droite en vert).



Hervé Le Guyader
a récemment publié :
**Biodiversité, le pari
de l'espoir**,
(Le Pommier, 2020).

Sur ce fossile, on distingue deux filets de matière noire le long du corps, l'un central, l'autre ventral. Le premier est identifié comme le tube digestif, le deuxième comme le cordon nerveux.

Si *Kylinxia zhangii* avait cinq yeux, *Anomalocaris* n'en avait que deux. En revanche, chacun était composé de 16 000 ommatidies, les unités optiques élémentaires constituant l'œil des arthropodes. Par comparaison, les grandes libellules en ont 23 000.

EN CHIFFRES

1 MÈTRE

Anomalocaris canadensis n'a de crevette que le nom : ce carnivore des mers cambriennes mesurait 1 mètre de long... Avec ses quelques centimètres, *Kylinxia zhangii* ne devait être pour lui qu'un amuse-gueule.

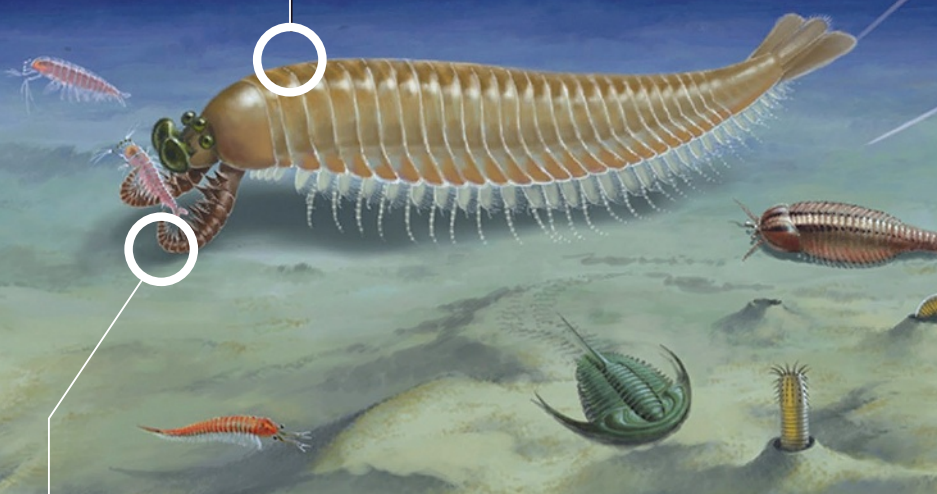
15

Chaque appendice frontal de *Kylinxia zhangii* compte 15 articles. Ceux d'*Anomalocaris canadensis* en ont à peu près autant. Les espèces plus tardives d'euarthropodes, en revanche, en ont moins.

1 MILLION

Caractérisés par un corps et des pattes segmentées, les arthropodes constituent le plus vaste embranchement connu, avec plus de 1 million d'espèces actuelles connues.

Les six spécimens de *Kylinxia zhangii* ont été trouvés dans une couche géologique nommée l'« étage 3 du Cambrien », remontant à entre 521 et 514 millions d'années.



Son appendice frontal lui servait à saisir ses proies, comme celui d'*Anomalocaris*.



Kylinxia zhangii

Taille: environ 6 cm

La tête est munie d'yeux à facettes d'une remarquable acuité. La bouche présente une curieuse structure : c'est un cône composé de différentes plaques disposées de manière radiale. D'abord confondue avec une méduse, elle a donné son nom au taxon – les radiodontes (ou bouche radiaire) – qui, depuis, rassemble aussi d'autres grands prédateurs fossiles.

Les phylogénies morphologiques placent les radiodontes comme le groupe le plus proche des deutéropodes, c'est-à-dire de tous les euarthropodes qui possèdent des appendices sur le second segment de leur tête (voir l'encadré page 94). Les euarthropodes, eux, rassemblent tous les animaux actuels et

fossiles caractérisés par un corps et des pattes segmentés (le terme « arthropodes » est le nom commun que l'on donne aux euarthropodes actuels). Ils sont subdivisés en mandibulés (crustacés, insectes, mille-pattes...) et chélicérés (araignées, scorpions, acariens...). Aujourd'hui, des phylogénies moléculaires récentes ont mis fin aux incessantes controverses sur la classification de ces différents groupes et des groupes voisins. En revanche, elles laissent sans réponse nombre de questions évolutives, comme l'origine des antennes des mandibulés ou celle des chélicères (des chélicérates, donc), ces redoutables crochets avec lesquels les araignées injectent leur venin.

UN NOUVEL EUARTHROPODE

Aussi, naturellement, l'une des questions immédiates qui s'est posée quand on a compris le lien de parenté des radiodontes et des euarthropodes a concerné l'appendice préhensile des radiodontes : est-il homologue d'un des appendices des euarthropodes actuels, comme une mâchoire, une chélicère, une antenne ? Son interprétation, cependant, restait délicate. Mais une réponse inattendue est venue d'un nouvel euarthropode fossile, *Kylinxia zhangii*, que l'équipe de Diying Huang, à l'institut de géologie et de paléontologie de Nankin, en Chine, vient de décrire