

> L'adaptation au sens strict peut être définie comme l'élaboration d'un nouveau trait sous l'effet de la sélection naturelle. Par exemple, chez les poissons plats pleuronectiformes, tels le turbot commun et la sole commune, qui se camouflent en se plaquant au sol, l'œil du côté aveugle migre lors de l'embryogenèse de l'animal: l'évolution a sélectionné ce nouveau trait, qui augmentait la valeur sélective de ces poissons.

Mais le problème devient crucial quand le caractère semble apparaître *de novo*, comme, par exemple, la plume de l'aile d'oiseau, car il est alors tentant d'y voir une finalité: une apparition soudaine laisse supposer que les forces en œuvre ont agi suivant un objectif précis, ce qui est impossible à admettre suivant la théorie de l'évolution et son jeu de mutation/sélection. Mais on sait maintenant que la plume existait déjà chez des dinosaures inaptes au vol. Elle leur servait très vraisemblablement de protection thermique, comme le poil chez les mammifères. De ce fait, la question n'est plus: «Comment la plume est-elle apparue?», mais «Comment la plume a-t-elle pu changer de fonction, à savoir passer de la protection thermique à la structuration d'une surface alaire?» C'est ce que les paléontologues américains Stephen Jay Gould et Elisabeth Vrba ont appelé en 1982 l'exaptation – l'acquisition, par des caractères déjà existants, de nouvelles fonctions.

TRANSPARENTES PAR HASARD

Le raisonnement sur les cristallines s'est construit de manière analogue. Le premier étonnement a consisté à se demander comment une protéine si exceptionnelle, avec des propriétés physiques si particulières, a pu apparaître, tant la probabilité que cela se produise est faible. Le deuxième étonnement tient au fait que ces propriétés (transparence, résistance, etc.) sont l'apanage de très nombreuses protéines d'une grande banalité. Car, outre les HSP, des enzymes classiques du métabolisme intermédiaire (l'ensemble des réactions chimiques qui se produisent dans les cellules), comme la lactate déshydrogénase, l'arginosuccinate lyase ou l' α -énolase présentent aussi ces propriétés. Par quel mécanisme en est-on arrivé là?

Lors de la structuration du système photorécepteur de l'œil, des protéines ayant les caractères de cristallines ont été non pas inventées, mais recrutées dans la batterie des protéines déjà existantes. Par coïncidence, des enzymes étaient dotées de propriétés de transparence qui, alors,

UN CASSE-TÊTE MÉDICAL

De nombreuses protéines travaillent au noir, comme le montre la base de données MoonProt 2.0, lancée en 2014 pour les répertorier. La complexité de la cellule est donc plus grande que prévue, car les fonctions secondaires des protéines introduisent des interactions moléculaires totalement inattendues. Ainsi, une enzyme telle que la GAPDH intervient de manière intracellulaire dans la glycolyse, mais aussi à la surface des cellules comme récepteur d'une protéine qui transporte du fer, la transferrine. Des rôles aussi distincts et aussi importants nécessitent des régulations complexes : comment réguler la quantité de molécules de GAPDH extracellulaires sans influencer sur le nombre de molécules intracellulaires ? Or de nombreuses protéines travaillant au noir sont corrélées avec des maladies. Il arrive qu'une mutation affecte une fonction, mais pas l'autre, par exemple.

On connaît aussi des cas où une mutation induit une nouvelle fonction imprévue.

De nombreuses protéines travaillant au noir sont ainsi impliquées dans des maladies auto-immunes, des maladies cardiaques, l'obésité, des diabètes, des cancers... Il est évident que choisir une telle protéine comme cible thérapeutique peut avoir des effets désastreux si la deuxième fonction est inconnue. Ainsi, la base de données MoonProt 2.0, au départ à visée fondamentale, est maintenant développée en vue d'applications médicales.

n'avaient aucune utilité biologique. Elles ont été recrutées par sélection naturelle, sans que leur rôle ancestral ne soit abandonné. C'est typiquement de l'exaptation.

À l'échelle moléculaire, d'autres termes sont utilisés. Pour les protéines, les biochimistes américains comme Constance Jeffery, de l'université de l'Illinois à Chicago, disent qu'elles «travaillent au noir» (*moonlighting proteins*), illustrant par là qu'elles ont un métier affiché (leur rôle d'enzyme) et qu'elles en jouent secondairement un autre, de manière discrète (leur rôle de cristalline). En 2014, l'équipe de Constance Jeffery a lancé la base MoonProt 2.0, qui répertorie les protéines travaillant au noir et leurs fonctions secondaires (voir l'encadré ci-dessus). Et pour nommer les gènes associés à ces protéines, Joram Piatigorsky a forgé le terme de partage de gène (*gene sharing*), étant donné qu'un même gène code une protéine qui peut présenter deux fonctions distinctes, comme si ces fonctions se partageaient le même gène.

Mais n'y aurait-il pas une relation cachée entre la première fonction enzymatique et la deuxième fonction de cristalline? L'étude des systèmes visuels des mollusques permet d'avancer une hypothèse. En effet, les principales cristallines des lentilles des yeux de calmar et de coquille saint-jacques sont des glutathione-S-transférases, des protéines dont le rôle premier est de détoxifier la cellule en la débarrassant de substances xénobiotiques, c'est-à-dire qui lui sont étrangères. Ainsi, chez les vertébrés comme chez les mollusques, les protéines choisies ont comme fonction ancestrale de favoriser l'intégrité cellulaire. N'est-ce pas avantageux d'avoir en grande concentration des molécules protectrices? ■

BIBLIOGRAPHIE

C. Chen et al., **MoonProt 2.0 : an expansion and update of the moonlighting proteins database**, *Nucleic Acids Res.*, vol. 46(D1), pp. D640-D644, 2018.

C. J. Jeffery, **Protein moonlighting : what is it, and why is it important ?**, *Phil. Trans. R. Soc. B*, vol. 373, article 20160523, 2017.

C. Slingsby et al., **Evolution of crystallins for a role in the vertebrate eye lens**, *Protein Science*, vol. 22, pp. 367-380, 2013.

J. Piatigorsky, **Evolution of mollusc lens crystallins : Glutathione S-transferase / S-crystallins and aldehyde dehydrogenase / Ω -crystallins**, *Amer. Malac. Bull.*, vol. 26, pp. 73 - 81, 2008.

L'AUTEUR



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

FAIRE UNE LIAISON À L'ŒUF DUR

Pour réaliser des sauces émulsionnées chaudes ou froides, des tensioactifs sont nécessaires. L'œuf peut en fournir, même s'il est dur.

Des idées floues se propagent parfois depuis des siècles dans les cuisines sans que l'on soit toujours assuré de leur véracité. Les expériences ont notamment réfuté l'idée que les œufs et l'huile devaient être à la même température quand on fait une mayonnaise, mais les incertitudes restent très nombreuses.

Par exemple, peut-on lier une sauce à l'aide d'œuf dur? On trouve dans *Les Dons de Comus*, de 1642, une «sauce au petit-Maitre»: «Faites infuser deux gousses d'ail dans une chopine de quinte-essence, ou consommé, avec une poignée de cerfeuil en branche. Passez à l'étamine. Pilez dans le mortier deux jaunes d'œuf durs, avec quelques cœurs de laitue blanchis, et même presque cuits, hachés auparavant. Mettez le tout dans une casserole avec deux pains de beurre, deux tranches de citron, un peu de poivre concassé. Tournez le tout sur le feu.»

L'ancienneté des précisions culinaires ne garantit hélas pas leur justesse. Expérimentons avec des œufs durs, cuits pendant dix minutes dans l'eau bouillante (pas plus, sinon le blanc devient caoutchouteux, le jaune devient sableux, et un cerne vert accompagné d'une odeur soufrée se dépose à la surface du jaune, preuve que ce gaz nauséabond et toxique qu'est l'hydrogène sulfuré a réagi avec le fer de certaines protéines).

Comme une émulsion de type mayonnaise nécessite une phase aqueuse où les gouttes d'huile pourront se disperser, nous avons mélangé deux cuillerées d'eau avec un jaune d'œuf dur, puis nous avons ajouté de l'huile goutte à goutte en fouettant, comme pour une mayonnaise: cette

Une émulsion d'huile dans l'eau, liée avec un jaune d'œuf dur.



émulsion (une sauce tartare) s'est parfaitement faite, preuve que le jaune d'œuf lie bien les sauces émulsionnées. Le jaune d'œuf dur ayant un goût différent du jaune cru, la sauce tartare est distincte de la sauce mayonnaise.

Ayant ainsi observé que le jaune d'œuf conservait des propriétés tensioactives (qui stabilisent les interfaces eau-huile), nous avons reproduit une sauce hollandaise, émulsion chaude cousine de la mayonnaise: dans une casserole, tout en fouettant de l'eau et du jaune d'œuf dur, nous avons ajouté de l'huile et nous avons obtenu une sauce chaude émulsionnée.

Pourquoi ces propriétés tensioactives? Le jaune d'œuf est composé d'eau, de phospholipides et de protéines; lesquels, des phospholipides et des protéines, assurent l'émulsion? Les phospholipides sont toujours présents et actifs, mais les protéines? Il y avait l'hypothèse que les protéines, ayant coagulé, seraient engagées dans un réseau, de sorte qu'elles n'auraient plus la possibilité de venir tapisser la surface des gouttes d'huile, laissant les phospholipides agir. Mais puisque la cuisson dégrade les protéines (la preuve étant la libération d'hydrogène sulfuré), on pouvait aussi supposer que ce processus produit des résidus tensioactifs. Alors?

Pour tester le rôle des protéines, nous avons cherché à faire une émulsion froide

à partir de blanc d'œuf (de l'eau et des protéines) dur: celui-ci a été écrasé dans deux cuillerées d'eau, puis nous avons ajouté de l'huile en fouettant... et obtenu une émulsion insipide, mais bien constituée. Ainsi, malgré la coagulation, les protéines conservent des propriétés tensioactives.

Ajoutons que la physicochimie moderne s'intéresse aux «émulsions de Ramsden», découvertes en 1903 par le biochimiste d'Oxford Walter Ramsden et popularisées par son compatriote Spencer Pickering en 1907, où la dispersion des gouttes d'huile est due non pas à des molécules, mais à de petites particules: la division du jaune ou du blanc pourrait ainsi apporter des particules s'ajoutant aux molécules déjà présentes. ■



LA RECETTE

- 1 Cuire une échalote émincée dans deux fois son volume d'eau, avec un peu d'acide citrique et d'acide tartrique.
- 2 Faire durcir un œuf dans l'eau bouillante pendant 10 minutes.
- 3 Au mortier et au pilon, broyer l'œuf dur et l'ajouter à l'échalote.
- 4 Ajouter deux cuillerées d'eau, du sel, un peu de glucose.
- 5 Ajouter du beurre et cuire en fouettant jusqu'à l'obtention d'une sauce émulsionnée chaude qui sera servie avec un bon steak.