



4. UNE SEICHE MÂLE *Sepia plangon* (à droite) est capable de présenter une coloration attrayante pour une femelle sur un côté et, face à un rival (non montré), d'imiter une femelle sur l'autre côté. Le rival, alors, ne l'attaque pas.



5. DANS L'ŒUF, quelques semaines avant l'éclosion, l'embryon de seiche (ici d'une espèce indonésienne) est une seiche miniature qui voit à travers la membrane et apprend.

périnatale chez la seiche. Depuis une dizaine d'années, l'une de nous (A.-S. Darmaillacq) s'intéresse ainsi aux capacités d'apprentissage précoce. Longtemps, on a cru que les jeunes découvraient le monde après la naissance, mais de nombreuses observations récentes montrent qu'au contraire, les stimulations extérieures sont perçues très tôt dans l'œuf par les embryons de seiche.

Un apprentissage... dans l'œuf

En 2008, A.-S. Darmaillacq a mis en évidence que, quelques semaines avant l'éclosion, environ deux mois après la ponte, les embryons de seiche voient leur environnement à travers la capsule de l'œuf : des seiches qui ont perçu des proies avant l'éclosion ou dans les heures qui l'ont suivie orientent leur préférence vers ces proies, même s'il ne s'agit pas de leur préférence innée. Cet apprentissage, nommé « empreinte alimentaire », permet aux jeunes seiches de ne pas choisir leur proie en faisant des essais au hasard, ce qui pourrait être risqué, mais d'orienter leur choix en fonction des proies disponibles et donc de s'adapter tôt et vite à d'éventuels changements de l'environnement.

L'apprentissage des proies est lui-même élaboré. L'un de nous (L. Dickel) a montré que la perception des proies est d'une grande précision : les seiches les distinguent sur la base de leur contraste ou de leur forme ; elles élaborent aussi des catégories perceptives « crabes » versus « crevettes » et généralisent les caractéristiques apprises

à des proies ressemblantes, en regroupant dans la même catégorie des crabes blancs et des crabes noirs, par exemple.

Les seiches et poulpes adultes sont aussi capables d'apprendre des tâches aussi diverses que s'orienter dans l'espace, ne plus tenter de capturer une proie inaccessible ou au goût désagréable ou encore distinguer des formes ou des textures différentes. Les informations acquises dans ces apprentissages peuvent être retenues sur plusieurs jours consécutifs, signe d'une bonne mémoire à long terme.

Ces découvertes ont toutes contribué à faire connaître les céphalopodes. De monstres insaisissables, ces animaux ont acquis, en Europe du moins, le statut d'êtres sensibles à la douleur physique et psychologique. La révolution des pratiques de la recherche est le signe de l'évolution rapide de la relation de l'homme à l'animal sous toutes ses formes et plus seulement celles qui lui ressemblent. Et la question se posera vite sur la réglementation des pratiques associées à l'exploitation industrielle de ces animaux, telles que la pêche ou l'aquaculture.

Les céphalopodes doivent-ils être considérés comme les seuls invertébrés « sensibles » ou comme les premiers invertébrés ainsi qualifiés ? Les connaissances sur la cognition ou la perception de la douleur avancent vite sur d'autres mollusques, sur l'abeille ou certains crustacés. L'usage de ces modèles est déjà réglementé dans plusieurs pays (Nouvelle-Zélande, Australie, Canada, Norvège...). Certains disent que cette réglementation va trop loin, d'autres prétendent au contraire que le respect de l'animal quel qu'il soit doit passer avant

la recherche scientifique. Signe des temps, ces débats, jusque-là anecdotiques bien que passionnés, émergent maintenant au niveau du législateur et du chercheur. Dans plusieurs pays européens, des laboratoires travaillant sur les céphalopodes ont commencé des recherches pour combler le manque de connaissance sur le bien-être de ces animaux (douleur, anesthésie, effets des conditions d'élevage, stress...). Car pour une fois, la loi est allée plus vite que la science !

En 1991, un groupe de travail de l'Institut britannique d'éthique médicale a proposé six critères pour considérer qu'un animal ressent de la douleur physique. Deux d'entre eux sont avérés chez les céphalopodes : ces animaux ont un cerveau très développé et répondent de façon persistante à des stimulations potentiellement douloureuses. En revanche, la présence des quatre autres critères n'est que « probable » : récepteurs à la douleur, voies nerveuses directes conduisant les informations douloureuses de ces récepteurs au cerveau, récepteurs aux substances opioïdes (système antidouleur endogène) et efficacité d'analgésiques qui atténuent la douleur chez les autres espèces.

La douleur psychologique et la « conscience » sont plus difficiles à évaluer. Elles sont au cœur des études de certains chercheurs, tels que J. Mather, ou David Edelman, de l'Institut des neurosciences de San Diego. Néanmoins, les faits sont déjà là : les krakens monstrueux des Victor Hugo, Jules Verne et autres romanciers du XIX^e siècle ont laissé la place à des êtres sensibles, joueurs et intelligents. ■

Le Silicène

sur les traces du graphène

Le silicène est un nouveau matériau constitué d'une unique couche d'atomes de silicium. Parce qu'il allie les caractéristiques de cet élément et les propriétés électroniques du graphène, il pourrait conduire à de nombreuses d'applications.

Un diamant ne ressemble guère à une mine de crayon, l'un est rare et cher, l'autre banal et bon marché. Pourtant, ils sont tous deux composés d'un seul type d'atomes : le carbone. Seul diffère l'agencement des atomes de carbone, c'est-à-dire la structure cristalline. L'exemple est bien connu, mais illustre qu'une simple différence de structure cristalline suffit à conférer aux matériaux des propriétés optiques, mécaniques, de conduction électrique ou thermique spécifiques. Comme le diamant et le graphite des mines de crayon – deux formes dites allotropes du carbone –, de nombreux éléments chimiques présentent plusieurs formes cristallines. L'étain, par exemple, existe sous forme d'étain « blanc », le métal usuel. Quand la température est inférieure à -50°C , il se transforme en étain « gris » semi-conducteur et pulvérulent.

Il est assez rare de découvrir de nouveaux allotropes. Pour le carbone, on se souvient de la découverte par Harry Kroto, Robert Curl et Richard Smalley du fullerène, une molécule quasi sphérique constituée

de 60 atomes de carbone. Ces chimistes ont reçu le prix Nobel de chimie en 1996 pour cette découverte. Les fullerènes ont trouvé de nombreuses applications en chimie notamment.

En 2004, un autre allotrope du carbone a suscité l'émotion : le graphène. Dans ce matériau, les atomes de carbone adoptent une structure hexagonale plane, en nid d'abeilles, et forment une monocouche atomique : c'est un matériau bidimensionnel. Les physiciens Andre Geim et Konstantin Novoselov, de l'Université de Manchester, l'ont obtenu par exfoliation d'un cristal de graphite : ils ont détaché les couches d'atomes de carbone les unes après les autres à l'aide d'un ruban adhésif et ont fini par obtenir un feuillet constitué d'une unique couche d'atomes de carbone. Leurs « expériences particulièrement innovantes » sur ce matériau bidimensionnel ont valu à leurs inventeurs le prix Nobel de physique en 2010.

Le graphène présente des propriétés exotiques, donnant lieu à des phénomènes

Guy Le Lay

quantiques étranges, qui tiennent essentiellement au fait que, dans ce carbone bidimensionnel, les porteurs de charge qui conduisent le courant se déplacent à une vitesse importante, ce qui permet d'envisager de nouvelles applications.

Or du carbone au silicium, il n'y a qu'une case dans le tableau périodique des éléments : juste au-dessous du carbone, on trouve le silicium. Cet élément est très utilisé dans l'industrie électronique en raison de ses propriétés de semi-conducteur. Il a été tellement étudié et utilisé que personne n'imaginait en découvrir un nouvel allotrope. Pourtant, en 2009, une forme cristalline inédite a été découverte : le silicène. Les atomes sont agencés en un réseau

hexagonal en nid d'abeilles, formant une monocouche atomique de silicium, à l'image du graphène. Ce nouveau matériau bidimensionnel, prévu théoriquement en 1994 par Kyozauro Takeda, de l'Université Waseda à Tokyo, et Kenji Shiraishi, de l'Université de Nagoya, ne semble pas exister à l'état naturel. Il a été synthétisé pour la première fois en 2009 par Patrick Vogt, de l'Université technique de Berlin, alors qu'il travaillait pour quelques mois dans mon équipe à Marseille.

Aujourd'hui, de nombreuses équipes font des recherches, essentiellement théoriques, sur le silicène. Pourquoi un tel engouement ? Ce matériau a une structure proche de celle des films bidimensionnels de carbone, et les physiciens espèrent qu'il combine les propriétés spécifiques du silicium et celles que présente son cousin le graphène.

Illustrant les enjeux liés à ces allotropes du carbone et du silicium, la Commission européenne a identifié l'étude du graphène – avec celle du cerveau humain – comme un des principaux projets de recherche pour les dix années à venir. Les recherches liées au graphène seront financées à hauteur d'un milliard d'euros sur dix ans. Mais loin de se cantonner au seul graphène, le projet s'étend aux matériaux analogues, « au-delà du graphène », et le silicène occuperait une place de choix.

Le silicène, peut-être même plus que le graphène, pourrait avoir des applications en physique des semi-conducteurs et serait plus facile à utiliser en microé-

lectronique. En effet, toute l'industrie de l'électronique repose principalement sur le silicium. Par conséquent, le silicène s'y intégrerait naturellement. L'émergence d'une électronique fondée sur le graphène imposerait de changer tous les processus de fabrication de circuits électroniques à semi-conducteurs. L'investissement serait colossal et le succès pas assuré. Cela justifie qu'une attention toute particulière soit portée au silicène aussi bien par les chercheurs que par les industriels.

Nous n'en sommes pas encore au stade de l'industrialisation. Le silicène a été synthétisé il y a seulement cinq ans et nous commençons à en préciser les caractéristiques. En effet, sa synthèse est plus

difficile que celle du graphène et même s'assurer que nous avons bien obtenu une couche monoatomique de silicium ayant les bonnes caractéristiques a nécessité des analyses poussées. Les progrès au sujet du silicène sont rapides et nous examinerons les résultats déjà obtenus.

Comme nous l'avons évoqué, on peut préparer des films de graphène par exfoliation, mais cette technique ne s'applique pas au silicène : le silicium ne présente pas, à l'état naturel, de structure cristallographique en feuillets équivalant à celle du carbone dans le graphite. Nous avons utilisé une autre technique, l'épitaxie, couramment utilisée pour fabriquer, entre autres, des plaquettes de silicium de grande qualité. Du silicium brut est chauffé à haute température dans une enceinte sous vide. Les atomes arrachés s'adsorbent à la surface du substrat. Les premiers atomes adsorbés forment des sites de nucléation sur lesquels se fixent d'autres atomes. Les forces électrostatiques entre les atomes de silicium et atomes du substrat influent sur la position des atomes qui se déposent, et l'on obtient un réseau cristallin régulier.

Pour le silicène, le choix du substrat est déterminant, notamment la structure cristalline de sa surface. Nous avons utilisé un monocristal d'argent qui présente, en surface, une structure hexagonale. De surcroît, d'après les calculs théoriques, quatre mailles du réseau cristallin de l'argent correspondent quasiment à trois mailles de silicène. Cela signifie que les contraintes

L'ESSENTIEL

- Le silicène est constitué d'une monocouche d'atomes de silicium. Sa structure est proche de celle du graphène.
- Le silicène a été synthétisé pour la première fois en 2009.
- Ses propriétés pourraient combiner celles du graphène et celles du silicium, élément essentiel des dispositifs électroniques.
- Les chercheurs commencent à mesurer ses caractéristiques : sa structure cristalline et ses propriétés électroniques.