

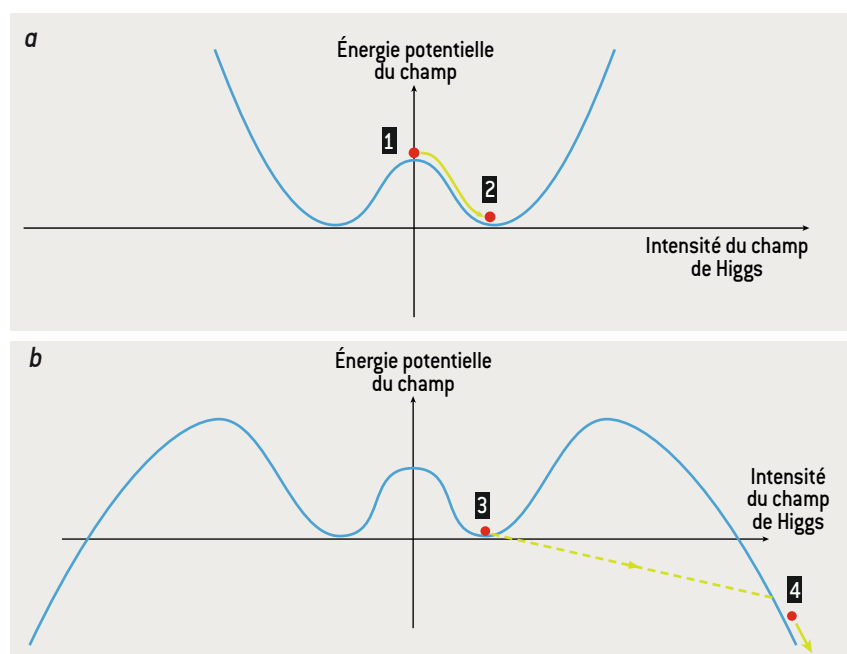
de calculer les couplages du boson de Higgs aux autres particules. Comme ces couplages diffèrent de ceux du modèle standard, les données du LHC devraient mettre à l'épreuve ces scénarios et en exclure certains.

Si, au contraire, le boson de Higgs est bien une particule élémentaire, de nombreux théoriciens pensent qu'il devra être intégré à un cadre plus vaste que le modèle standard, telle la supersymétrie. Dans cette théorie, chaque particule du modèle standard aurait un partenaire ayant des propriétés semblables, à l'exception du spin. Les corrections sur la masse du boson de Higgs dues aux particules supersymétriques compenseraient alors celles des particules du modèle standard. La masse du boson de Higgs ne deviendrait pas infinie. Qui plus est, dans l'hypothèse de la supersymétrie, l'état actuel de l'Univers serait stable et la masse du boson de Higgs serait inférieure à 130 GeV, comme observé.

Un ou plusieurs bosons de Higgs ?

En fait, la théorie de la supersymétrie prévoit non pas un, mais cinq bosons de Higgs, dont le moins lourd aurait un comportement légèrement différent de celui du boson de Higgs du modèle standard. La chasse est donc ouverte pour trouver ces autres bosons de Higgs et mesurer des signes caractéristiques de la supersymétrie dans la production et la désintégration du boson qui a été découvert.

En plus d'étudier de près la nouvelle particule et chercher d'autres bosons de Higgs, les physiciens du LHC traquent des signes directs de la production de particules supersymétriques. Dans de nombreux modèles, la particule supersymétrique la plus légère est électriquement neutre, interagit faiblement avec les autres particules et est stable. Elle aurait été produite dans les premiers instants de l'Univers et serait présente en grandes quantités aujourd'hui sous la forme de matière noire. L'existence de cette dernière a été postulée par les astrophysiciens et les cosmologistes pour expliquer de nombreuses observations. Au LHC, les particules supersymétriques seraient détectées sous la forme d'événements dans lesquels une partie de l'énergie et de la quantité de mouvement de la collision serait manquante, car emportée par les



3. LE MÉCANISME DE BRISURE DE SYMÉTRIE proposé par F. Englert, R. Brout et P. Higgs suppose que les équations de la théorie vérifient une certaine symétrie, mais pas les solutions des équations. On peut représenter de façon simplifiée le potentiel supposé du champ de Higgs en fonction de l'intensité du champ [a, courbe bleue]. Une intensité nulle du champ [1] correspond à une solution symétrique, mais pas à l'état de plus basse énergie : cette solution est donc instable. On a alors une transition spontanée vers une position stable [2 par exemple], mais qui n'est plus symétrique. Le champ a alors une intensité non nulle, ce qui est à l'origine de la masse des particules. Pour un boson de Higgs de masse inférieure à 127 GeV, si on inclut des corrections quantiques, l'équation du potentiel est modifiée (b). La position [3] n'est plus celle de plus basse énergie. Par effet tunnel, le champ pourrait passer en position [4] et son intensité continuer à croître sans limite, ce qui modifierait profondément la physique de l'Univers.

particules de matière noire. De tels signaux n'ont pas encore été observés assez fréquemment pour être attribués à des processus en dehors du modèle standard. Les chances d'observer de tels événements augmenteront à partir de 2015, quand le LHC fonctionnera avec une énergie de collision plus importante (14 téraélectronvolts au lieu de 8 actuellement).

Le boson de Higgs pourrait nous éclairer sur d'autres questions encore en physique des particules et en cosmologie. Dans le modèle du Big Bang, matière et antimatière auraient été produites dans des proportions égales, mais se seraient annihilées en produisant des photons. Si ce scénario est correct, toute la matière et l'antimatière devraient avoir disparu. Dans ce cas, pourquoi l'Univers contient-il de la matière et pas du tout d'antimatière ? Cela pourrait s'expliquer par une asymétrie de comportement entre la matière et l'antimatière, qui serait responsable d'un léger excès de matière et qui aurait donc survécu à l'annihilation. Le modèle standard présente une telle asymétrie, mais elle

est insuffisante. La supersymétrie et divers modèles contiennent d'autres sources d'asymétrie susceptibles d'expliquer la disparition de l'antimatière. Ces asymétries supplémentaires pourraient apparaître directement ou indirectement dans les propriétés du boson de Higgs.

Si la nouvelle particule découverte au LHC est bien le boson de Higgs, elle complètera notre description de la matière visible de l'Univers et des processus qui ont régi le Big Bang après le premier milliardième de seconde. Comme nous l'avons vu, le boson de Higgs pourrait être lié à la matière noire et avoir joué un rôle dans la production de la matière dans l'Univers. C'est cependant une particule très différente de toutes celles que nous connaissons, et elle pose presque autant de questions qu'elle n'apporte de réponses. Son existence même et la valeur de sa masse suggèrent que le modèle standard ne peut être le fin mot de l'histoire, et que le LHC pourrait nous révéler des pans d'une nouvelle physique. La quête se poursuit. ■

LES SALPES

reines du plancton marin

Jean-Claude Braconnot

Les salpes, une des formes les plus abondantes de plancton animal, filtrent l'eau de mer à une vitesse remarquable. Cette propriété leur confère un rôle important dans le fonctionnement du milieu marin.

Avila Beach, comté de San Luis Obispo, Californie. Le 26 avril 2012, la centrale nucléaire locale, Diablo Canyon, au bord de l'océan Pacifique, est contrainte de stopper d'urgence son fonctionnement. Le circuit de refroidissement de ses deux réacteurs est alimenté à l'eau de mer; or, depuis deux jours, des vents du Sud charrient vers l'entrée du circuit... des salpes. Ces organismes gélatineux en forme de tonneau, longs de un à une trentaine de centimètres selon les espèces, se sont agglutinés en si grand nombre sur le filtre du circuit qu'ils l'ont bouché pendant plusieurs jours.

Les salpes, deuxième forme la plus abondante de zooplancton – le plancton animal – après les copépodes (de petits crustacés), sont de vieux ennemis des pêcheurs marins. Le 13 avril 1979, notamment, entre Saint-Tropez et la frontière italienne, la pêche sur la côte méditerranéenne fut catastrophique suite à une invasion de l'espèce *Salpa fusiformis*: «Il y avait en suspension, et en profondeur, des millions de "choses" [qui] sem-

blaient respirer», rapporta un pêcheur dans le quotidien *Nice-matin*. Cette espèce est aussi bien connue des baleiniers industriels chassant dans l'Antarctique: là où les salpes abondent, il n'y a aucune chance de capturer des baleines à fanons, car celles-ci n'y trouvent plus de crevettes du krill, leur nourriture, et migrent à leur recherche. Les salpes, comme le krill, se nourrissent de phytoplancton, le plancton végétal, mais se reproduisent plus vite, si bien qu'elles l'emportent sur leur compétiteur...

La place de ces animaux gélatineux, très peu consommés, dans l'écosystème marin, n'a pas toujours été comprise. On a longtemps pensé qu'ils représentaient une sorte d'impasse dans la chaîne alimentaire, où ils ne retombaient que lors de leur décomposition. Aujourd'hui, grâce à l'étude de leur cycle de vie et de l'impact de ce cycle sur les quantités de carbone organique disponible dans les fonds marins, on comprend mieux leur rôle fondamental dans le milieu. Gros consommateurs de plancton végétal, sans



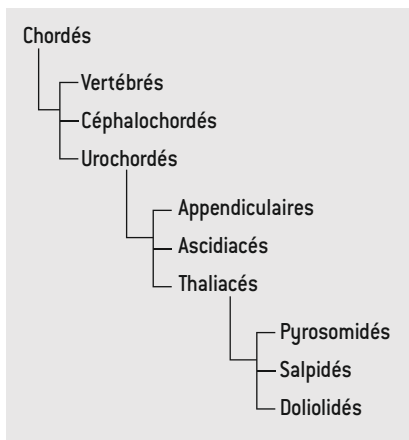


1. UNE SALPE SOLITAIRE
de l'espèce *Thetys vagina*
photographiée dans la baie
de Monterey, en Californie (*en haut*),
et des individus en chaîne
de l'espèce *Pegaea confoederata*
(*ci-contre*) photographiés à San Diego,
en Californie. Ces salpes mesurent
respectivement une trentaine
et une vingtaine de centimètres.

L'ESSENTIEL

- Les salpes, organismes gélatineux marins en forme de tonneaux de 1 à 30 centimètres, sont la deuxième forme la plus abondante de plancton animal.
- Grâce à un système de filtration efficace, elles concentrent les particules flottant dans l'eau de mer en pelotes qui coulent vers le fond marin.
- Ces pelotes nourrissent les peuples des abysses et contribuent au stockage du carbone dans les sédiments.
- Son mode de reproduction rapide et l'absence de prédateurs font de la salpe un acteur majeur de l'écosystème marin.

© Richard Herrmann/Minden Pictures/Corbis - © Norbert Wu/Science Faction/Corbis



2. DANS LA CLASSIFICATION DU VIVANT, les salpes (salpidés) sont, comme les vertébrés, issues des chordés, ainsi nommés car ils présentent une corde cartilagineuse dorsale [chorde]. Dans leur embranchement (urochordés), tous les membres ont une tunique – une membrane résistante et transparente. Certains (appendiculaires) ont une chorde toute leur vie et vivent en haute mer (pélagiques), d'autres (ascidiacés) sont fixés au fond de la mer. Les thaliacés, dont font partie les salpes, sont tous pélagiques. Les pyrosomidés sont très lumineux et vivent en colonies ; ils forment un manchon avec une tunique commune.

prédateurs ou presque, ils compactent la matière vivante qu'ils absorbent sous forme de grosses particules – des pelotes fécales –, qui tombent vers les fonds marins grâce à leur forte densité. Ces pelotes participent à ce que l'on nomme la neige marine, des particules qui, en tombant, nourrissent les organismes des abysses, là où la lumière ne pénètre plus et où toute vie végétale est exclue. Comment les salpes fabriquent-elles ces pelotes ? Comment envahissent-elles une région et pourquoi ? Quel est leur impact sur leur environnement ? Pour le comprendre, examinons de plus près leur structure, leur mode de vie et leur développement.

L'eau de mer contient en suspension nombre de particules organiques inertes ou animées. Nommés plancton en 1887 par le médecin physiologiste allemand Victor Hensen (du grec *planctos*, qui signifie errer passivement – racine commune aux mots planer et planète), ces organismes vivant en pleine eau sont soit végétaux, soit animaux. Ils peuvent être aussi bien microscopiques unicellulaires, telles les bactéries,

que pluricellulaires et visibles à l'œil nu, avec une taille variant de quelques centimètres ou décimètres, comme certaines méduses, à plusieurs mètres, comme des colonies de siphonophores ou des chaînes de salpes. Le plancton végétal ou phyto-plancton utilise l'énergie du soleil pour se développer à partir des éléments nutritifs dissous dans l'eau. Ses membres (diatomées, dinoflagellés, coccolithophoridés...) sont des algues unicellulaires photosynthétiques de un micromètre à quelques millimètres, parfois munies d'un ou deux flagelles.

Le plancton animal, quant à lui, présente une grande variété de formes, toutes incapables de grands déplacements : des organismes unicellulaires (protozoaires) de quelques micromètres à plusieurs millimètres aux formes étonnantes (ciliés, étoilés...) et des organismes pluricellulaires (méta-zoaires) allant des crustacés planctoniques de quelques millimètres, tels les copépodes, aux méduses et aux mollusques. Les larves et œufs de nombreuses espèces marines (poissons, mollusques, échinodermes) en font aussi partie. Le plancton animal

ANATOMIE D'UNE SALPE

La forme solitaire ou oozoïde de l'espèce *Salpa fusiformis* (décrite pour la première fois sous ce nom par le naturaliste français Georges Cuvier en 1804) est de taille suffisante (trois à quatre centimètres de long) et assez transparente pour que l'on observe ses organes. Elle est aussi assez rigide pour résister aux conditions de capture dans des filets, qui détruisent les individus trop fragiles.

Son corps est une cavité prismatique, à symétrie bilatérale, entourée d'une tunique, une membrane résistante et transparente. Pendant la nage, ses muscles, qui enserrant la cavité, se contractent et chassent l'eau de la cavité par le siphon cloacal. Grâce à la tunique rigide, l'individu reprend sa forme quand les muscles se décontractent. Ce mouvement remplit la cavité en déclenchant l'absorption d'eau via le siphon buccal. L'animal est ainsi propulsé en avant : les tuniciers pélagiques sont les inventeurs du moteur à réaction !

L'eau avalée par l'animal ressort filtrée grâce à un filet constitué de fils de mucus entremêlés en un réseau de maille assez étroite pour retenir phytoplancton et bactéries. Le mucus est produit et acheminé par une gouttière ciliée, l'endostyle, jusqu'à l'arc péricoronal, une rangée de cellules ciliées. L'arc récupère le mucus et le répartit en un filet produit en continu tant qu'il y a de la nourriture. Le filet et les particules piégées sont acheminés dans le nucléus, d'où ils ressortent, après digestion partielle, sous forme de pelotes fécales.

1 Siphon buccal

L'eau entre par cette bouche. Deux muscles (un par lèvres) assurent la fermeture de l'orifice au cours de la nage.

2 Tunique cellulosique

Composée de cellulose animale, elle constitue une enveloppe résistante et transparente.

3 Arc péricoronal

Cette rangée de cellules ciliées qui entoure la paroi du pharynx est le prolongement de l'endostyle. Elle récupère le mucus qu'il produit et le répartit en un filet. Sur la face dorsale de l'animal, l'arc aboutit à l'extrémité de la branchie en une fossette ciliée glandulaire, dont le rôle est encore méconnu.

4 Endostyle

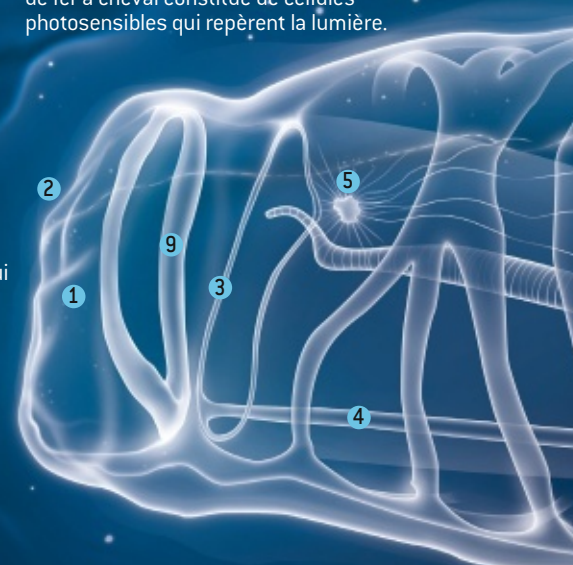
Cette gouttière ciliée longe la face ventrale de la salpe, de la région du nucléus (15) à l'arc péricoronal (3). Elle produit du mucus et le transporte vers l'arc péricoronal.

5 Ganglion nerveux

Ce centre nerveux est en quelque sorte le cerveau de la salpe. Il commande sa dizaine de muscles par l'intermédiaire d'autant de neurones. Il porte un œil pigmenté en forme de fer à cheval constitué de cellules photosensibles qui repèrent la lumière.

6 Filet muqueux

Fabrique par l'arc péricoronal, ce réseau régulier de fils de mucus forme un cône gonflé par le courant d'eau qui aboutit dans l'œsophage. Il filtre l'eau en retenant les particules de taille supérieure à un micromètre.



consomme le plancton végétal et sert généralement de nourriture aux organismes vivants plus gros et plus agiles tels que les poissons munis de dispositifs pour filtrer l'eau – les harengs, sardines ou anchois, par exemple, qui arborent des branchiospines, sortes de peignes fins sur les branchies – ou les baleines à fanons.

Plus proches des vertébrés que des méduses

Une partie de cette faune, toutefois, semble impropre à la consommation. Il s'agit du zooplancton gélatineux, ainsi nommé à cause de son aspect, dû à sa grande teneur en eau (toujours plus de 95 pour cent du poids frais). Cette composition lui confère une densité proche de celle de l'eau de mer, dans laquelle il se maintient sans effort. Les espèces du zooplancton gélatineux appartiennent à des groupes zoologiques variés, parfois éloignés dans la classification : méduses, mollusques, hydres flottants, siphonophores, tuniciers. Elles ont en commun une grande fragilité et une transparence presque totale.

Les salpes sont une forme de zooplancton gélatineux. Dans la classification du vivant, elles constituent l'ordre des salpides, un des trois ordres de la classe des thaliacés avec les pyrosomides et les doliolides. Bien que les salpes ressemblent à des méduses par leur aspect gélatineux et leur vie sans attache, elles s'apparentent structurellement plus aux vertébrés : elles font partie de l'embranchement des urochordés (aussi nommés tuniciers, car ils sont enveloppés d'une membrane constituée d'eau, de protéines et d'un glucide proche de la cellulose, la tunicine). Les urochordés et les vertébrés ont pour ancêtres communs des chordés, caractérisés par la présence, sur leur face dorsale, d'une corde cartilagineuse nommée chorde, ancêtre de la colonne vertébrale (voir la figure 2). Les salpes ont perdu cette chorde, disparue au cours de l'évolution, mais elle est conservée chez d'autres urochordés nommés appendiculaires. Elle est aussi présente

L'AUTEUR



Jean-Claude BRACCONNOT est océanographe de l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer (CNRS/UPMC), dans les Alpes-Maritimes.

SUR LE WEB

Chroniques du plancton

Ce site rassemble de magnifiques films du plancton (dont des salpes) réalisés dans le cadre de l'expédition *Tara Océans* et de l'Observatoire océanologique de Villefranche-sur-Mer (CNRS/UPMC). www.planktonchronicles.org/



7 Cavité cloacale

L'eau filtrée par le filet se retrouve dans cette cavité, d'où elle ressort par le siphon cloacal.

9 Muscles

La paroi dorsale est parcourue par neuf bandes musculaires assez larges, composées de plusieurs fibres striées, interrompues sur la face ventrale. Pendant la nage, les muscles se contractent et chassent l'eau de la cavité vers le siphon cloacal.

11 Branchie

Cette travée creuse oblique... n'est pas à proprement parler une branchie. Elle contient un gros vaisseau parcouru d'un flux sanguin rapide et vigoureux, relié d'un côté au cœur, et de l'autre à la paroi interne du corps. La surface interne de la salpe est creusée de sinus sanguins répartis le long des muscles et par lesquels s'effectuent les échanges respiratoires avec l'eau ingérée. Le sang, incolore, y circule selon un parcours bien défini. Les petites rangées de cils qui strient l'extérieur de la branchie participent à la circulation de l'eau au sein de l'animal.

12 Siphon cloacal

Par cet orifice s'échappent l'eau chassée de la cavité, les pelotes fécales et la génération suivante. Un muscle l'entoure.

13 Cœur

C'est un simple tube musculueux, très visible par ses contractions péristaltiques alternativement d'avant en arrière et en sens inverse après un court arrêt entre les deux mouvements.

14 Pelote fécale

Ces palets rectangulaires de quelques millimètres larges par le nucléus sont libérés dans la mer via le siphon cloacal.

15 Nucléus

Constituée des viscères de la salpe (œsophage, estomac, intestin, pancréas), cette masse opaque est la seule partie colorée de l'individu.

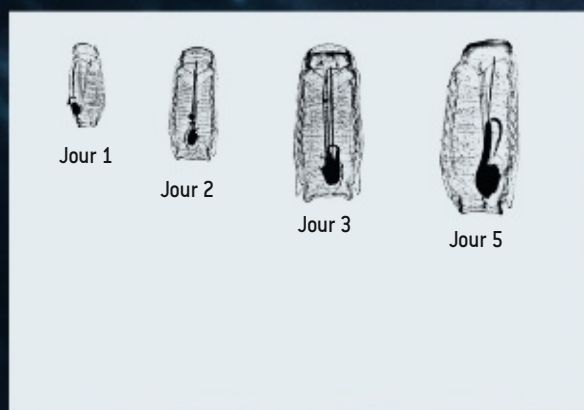
8 Pharynx

L'eau ingérée entre dans cette cavité conique, où les particules sont capturées par le filet.

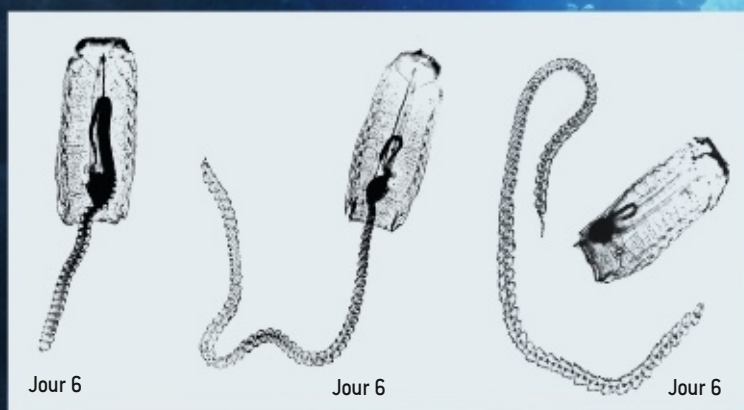
10 Stolon

Organe reproducteur de la forme oozoïde des salpes, ce cordon est composé de tous les types de cellules présents dans l'individu. C'est lui qui, en grandissant et en se segmentant, fournira les individus agrégés en chaînes de la génération suivante, les blastozoïdes.

LE CYCLE DE REPRODUCTION DE *SALPA FUSIFORMIS*



A. LE STADE ASEXUÉ DES SALPES. Chaque individu (oozoïde, issu d'un œuf par un stade larvaire, voir l'étape D) mène une vie solitaire, nage, se nourrit par filtration de l'eau et croît. Son organe reproducteur (le stolon) grandit et se segmente en bourgeons accolés.



B. LA LIBÉRATION DE LA GÉNÉRATION SUIVANTE. À une taille suffisante, l'extrémité du stolon de l'oozoïde est émise à l'extérieur via le siphon cloacal. Les bourgeons se gonflent d'eau, révélant de petits individus de salpes attachés les uns aux autres. Les jeunes individus, vrais jumeaux produits par bourgeonnement (blastozoïdes), sont libérés par tronçons successifs d'une centaine tous les deux jours, et au moins cinq ou six fois. Chaque individu se développe au sein de la chaîne.

chez les doliolés (doliolids) au stade larvaire, qui la perdent au cours de leur développement. Les chordés portent tous, de surcroît, un système nerveux dorsal, constitué, chez les salpes, d'un ganglion nerveux associé à un œil pigmenté.

Un filet à plancton pour se nourrir

Les salpes, comme les autres thaliacés et contrairement aux ascidies, fixées au fond des océans (ou sur des algues elles-mêmes fixées au sol), sont pélagiques : elles vivent en haute mer, à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 800 mètres. En surface, elles se nourrissent du phytoplancton.

Au printemps, lors des grands développements du vivant dans les couches superficielles de la mer (jusqu'à 100 mètres de profondeur) liés à l'élévation de la température et à l'augmentation de l'ensoleillement, on observe de grandes poussées de phytoplancton. Ces organismes unicellulaires microscopiques riches en pigments chlorophylliens se multiplient à grande vitesse par photosynthèse, car la lumière pénètre le milieu. Cette croissance est limitée aux eaux de surface, la lumière diminuant avec la profondeur. Au-dessous de 150 mètres, le noir absolu règne dans tous les océans.

Sortes de petits tonneaux présentant un orifice à chaque extrémité, les salpes se nourrissent en aspirant l'eau de mer et tout ce

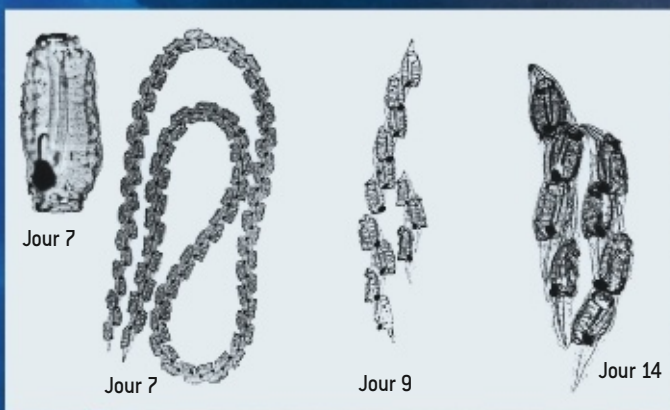
qu'elle contient (tant que la taille est compatible), soit surtout du phytoplancton en surface. L'eau de mer entre par un orifice (siphon buccal) et ressort, filtrée, par l'autre (siphon cloacal) : les salpes retiennent les particules planctoniques qui flottent dans la masse d'eau en filtrant celle-ci à l'aide de leurs sécrétions muqueuses (voir l'encadré page 38). Elles ont en effet inventé... un filet à plancton semblable à celui utilisé chaque jour à la Station zoologique de Villefranche-sur-Mer pour prélever des échantillons de plancton en haute mer.

Les fils de soie ou de nylon sont remplacés par de minces fils de mucus durci organisés en un maillage rectangulaire qui forme un cône flexible entre la « bouche » (siphon buccal) de la salpe et son tube digestif, le nucléus (voir la figure 3a). Lorsque l'eau pénètre dans le pharynx de l'animal (la partie antérieure de la cavité du tonneau), le filet muqueux se gonfle (et il se dégonfle lorsque l'eau filtrée est expulsée). Les particules retenues dans le filet muqueux sont avalées – avec lui – dans l'œsophage, puis l'estomac. Les pelotes fécales, des palets rectangulaires de quelques millimètres de côté, sont le produit de la digestion partielle de ce mélange. Larguées par le nucléus, elles sont rejetées à l'extérieur via le siphon cloacal, tout comme l'eau pure filtrée par l'animal.

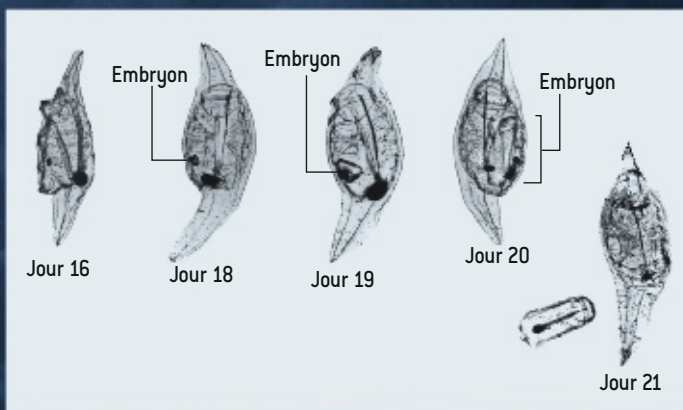
Les salpes de surface sont donc surtout phytophages. De quoi, en revanche, se nourrissent celles observées plus en profondeur,

là où le phytoplancton ne peut plus se développer faute de lumière ? Si la formation du filet muqueux était connue dans ses grandes lignes depuis la fin du XIX^e siècle, l'énigme n'a été résolue qu'en 1991, lorsque nous avons réussi, à la Station zoologique de Villefranche-sur-Mer, à prélever et fixer un échantillon du filet de l'espèce *Pegea confoederata* malgré la fragilité du matériau, et analysé sa structure au microscope électronique à balayage (voir la figure 3b). La petite dimension de la maille rectangulaire était de 0,57 micromètre (un demi-millième de millimètre), pour un individu mesurant plus de dix centimètres ! En d'autres termes, l'animal, parmi les plus grandes formes du macroplancton, est capable de filtrer l'eau de mer jusqu'à en retenir les bactéries qu'elle contient, longues d'environ un micromètre.

Les bactéries constitueraient même une importante source de nourriture pour les salpes. C'est la conclusion à laquelle sont arrivés, en 2010, Kelly Sutherland, de l'Institut océanographique Woods Hole, dans le Massachusetts aux États-Unis, et ses collègues en nourrissant des salpes *Pegea confoederata* avec des billes en polystyrène de 0,5 à 3 micromètres et en mesurant par vidéomicroscopie la vitesse d'impact de ces billes sur le filet muqueux : non seulement les petites billes, même de taille inférieure à la maille du filet muqueux, étaient piégées dans le filtre, mais elles l'atteignaient plus vite que les grandes. Les bactéries étant



C. LE STADE SEXUÉ DES SALPES. Les blastozoïdes sont hermaphrodites séquentiels : d'abord femelles, puis mâles. Les chaînes fragiles se segmentent en groupes d'individus sexués au stade femelle. Chacun possède un ovaire aussitôt fécondé par les produits mâles présents dans l'eau. À la fin de sa croissance, un seul œuf se développe en un embryon attaché à sa mère par un placenta qui le nourrit.



D. L'EMBRYON GRANDIT et occupe de plus en plus de place dans la cavité maternelle. Peu à peu, encore attaché, il montre des mouvements de nage et filtre l'eau pour se nourrir. Quand il atteint une taille suffisante, il est libéré et sort de la cavité de sa mère (toujours attachée à sa chaîne). Il commence alors sa vie solitaire d'oozoïde (voir l'étape A). Sa mère devient alors mâle et termine sa vie en émettant dans l'eau des spermatozoïdes qui féconderont les jeunes chaînes.

abondantes partout dans l'océan et vite digérées du fait de leur petite taille, elles constitueraient donc une part non négligeable de l'alimentation des salpes.

Les bactéries sont ainsi sans doute la source de nourriture qui permet à des salpes de vivre en profondeur (entre 600 et 800 mètres). De telles populations ont été décrites vers 1985-1990, lors de plongées profondes avec le submersible français CYANA10, au cours des missions *MigraGel* (Migrations des Gélatineux) en Méditerranée, au large de Nice-Villefranche: on y a repéré des individus en parfaite forme qui se reproduisaient et vivaient dans le noir absolu, dans des eaux pourtant sans phytoplancton, mais riches en bactéries, comme toute région de l'océan.

En 2006, Laurence Madin, de l'Institution océanographique Woods Hole, et ses collègues ont mis en évidence un autre mécanisme qui expliquerait la vie de certaines salpes en profondeur: au large de la côte Est des États-Unis, l'espèce *Salpa aspera* nage verticalement sur de longues distances, vivant en profondeur le jour (entre 600 et 800 mètres) et remontant en surface la nuit pour se nourrir de phytoplancton.

En surface, les salpes sont loin d'être les seuls consommateurs de phytoplancton. Leur multiplication rapide leur offre toutefois un sérieux avantage sur leurs compétiteurs. Le cycle de développement des salpes est caractérisé par l'alternance de deux générations d'individus anatomique-

Photogrammes

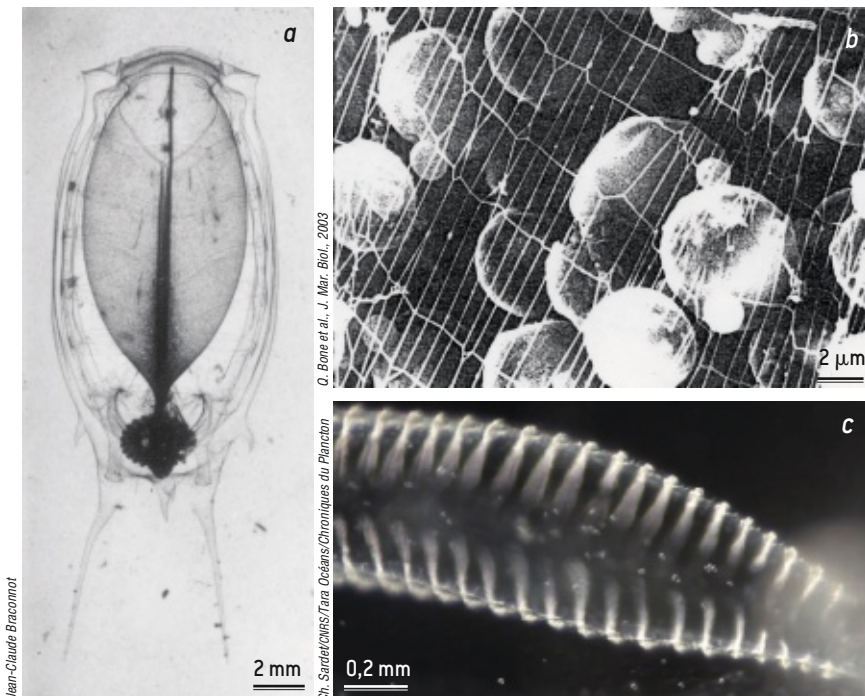
Les représentations ci-dessus ne sont pas des macrophotographies classiques, celles-ci étant impossibles tant les salpes sont fragiles: les manipulations et la chaleur de l'éclairage les détruiraient. Il s'agit de photogrammes, obtenus sans intervention d'appareil photographique ni d'une optique quelconque. On a profité de la transparence des individus pour en obtenir des images en chambre noire à éclairage inactinique (labo photo classique) sur un plan-film photographique à grain très fin, disposé sous un aquarium de faible profondeur où nagent librement et en toute quiétude les animaux, qui restent parallèles au fond. On déclenche un éclair de flash électronique issu d'un diaphragme (un trou de 2,5 millimètres de diamètre dans un carton noir) situé à deux mètres au-dessus de l'aquarium. Ainsi, l'ombre des individus est enregistrée sur le plan-film en une image parfaitement nette qui montre tous les organes de l'individu transparent.

On observe ici le développement, jour après jour, du même individu solitaire maintenu en élevage en chambre fraîche (15°C), puis d'une portion de chaîne dont un individu restera en observation quotidienne pendant toute la gestation de l'embryon, jusqu'à sa libération au 21^e jour de l'élevage. Les tirages (positifs) des photogrammes sont tous à la même échelle. Cette technique a été utilisée pour d'autres organismes transparents, telles des petites méduses ou des larves, ou pour conserver des images d'échantillons de plancton total vivant.

ment différents. Les uns, nommés oozoïdes, sont solitaires, asexués, et issus d'un œuf fécondé qui s'est développé dans les autres. Ces derniers, nommés blastozoïdes, vivent en chaînes nées d'un bourgeonnement des individus solitaires (voir l'encadré ci-dessus).

600 petits en 20 jours

L'oozoïde présente un organe reproducteur caractéristique, une sorte de cordon nommé stolon et composé de tous les types de tissus cellulaires présents dans l'individu. En se segmentant, il fournira les individus agrégés en chaînes de la génération suivante: les blastozoïdes. Chez *Salpa fusiformis*, ici choisie comme organisme modèle pour sa transparence, le blastozoïde a une anatomie proche de celle de l'oozoïde. On y retrouve les mêmes organes, mais l'individu n'est pas symétrique. Les siphons sont reportés vers la face dorsale et la tunique présente des prolongements coniques à l'avant et à l'arrière de l'individu, caractéristiques de l'espèce (d'où le terme *fusiformis*). Les muscles sont différents en nombre et en disposition de ceux de l'oozoïde. Il n'y a pas de stolon, mais, sur la paroi latérale postéro-dorsale, un ovaire est visible. Après fécondation, l'œuf unique se divisera sur place dans son enveloppe folliculaire. Celle-ci formera un placenta par lequel l'embryon restera attaché à sa mère jusqu'à sa libération après son développement.



Jean-Claude Bracconnot

Q. Bone et al., J. Mar. Biol., 2003

Ch. Sardet/CNRS/Tara Océans/Chroniques du Plankton

3. UN FILET MUQUEUX CONIQUE (a, ici en extension maximale dans la forme oozoïde de l'espèce *Thalia democratica* vue de face) permet aux salpes de filtrer l'eau de mer qu'elles absorbent. Le filet est constitué de mailles rectangulaires assez étroites pour piéger les bactéries (b, ici observé en microscopie électronique à balayage chez la salpe *Pegea confoederata*). Les salpes sont les plus rapides filtreurs de tout le zooplancton marin. Les cils qui strient la branchie de la salpe créent un courant qui facilite la filtration (c, *Pegea confoederata*).



Christian Sardet/CNRS/Tara Océans/Chroniques du Plankton

4. LES SALPES SE MEUVENT en se contractant périodiquement grâce à des bandelettes de muscles striés transversales constituées de fibres, ici observées au microscope chez l'espèce *Pegea confoederata*. Le nombre de muscles et leur disposition déterminent la classification des salpidés.

Le cycle de développement des salpes est rapide : en 20 jours, un individu oozoïde a engendré plusieurs centaines de jeunes oozoïdes. Dans des conditions favorables, c'est-à-dire lorsque la nourriture abonde, la multiplication par chaînes de centaines d'individus tous les deux ou trois jours par un seul animal libre aboutit à l'invasion explosive de la masse d'eau au point qu'on observe des proliférations sur des centaines de kilomètres carrés : des bassins marins entiers sont occupés en quelques jours. Cela ne dure jamais longtemps, car la nourriture s'épuise. L'explosion de population cesse, laissant place à une population faible qui cohabite alors avec d'autres espèces planctoniques, ses éventuels compétiteurs dans la même niche écologique. Les différentes espèces de salpes (peu nombreuses, une quinzaine tout au plus) sont présentes dans toutes les mers du globe. *Salpa fusiformis* produit de grandes populations envahissantes aussi bien en Méditerranée au printemps qu'en mer du Nord et autour des îles Britanniques, ou en océan Antarctique.

L'importance des salpes en masse de matière vivante dans nos eaux, l'efficacité de leur action de filtration de l'eau témoignent de l'ampleur de leur rôle dans l'écosystème pélagique, de haute mer. En filtrant

l'eau de mer en permanence, elles assurent la digestion partielle et l'agglomération de matière végétale et animale en grosses particules denses et compactes, les pelotes fécales. Rejetées dans le milieu, ces pelotes plongent vite vers le fond des mers, où elles servent de nourriture aux espèces vivant plus en profondeur, y compris celles qui sont inféodées au fond lui-même. Cela semble être l'une des explications de la présence animale dans les ténébreux fonds sous-marins, là où, privé de lumière, le plancton nourricier ne peut se développer.

Des pelotes fécales pour stocker le carbone

Il y a une vingtaine d'années à la sortie de la rade de Villefranche-sur-Mer, François Fernex, un géologue spécialiste des couches superficielles du fond marin, a ainsi montré que les pelotes fécales des salpes augmentaient la teneur en substances azotées des premiers centimètres du sédiment déposé sur les fonds marins vers 80 mètres de profondeur. En analysant des prélèvements effectués entre 1987 et 1990, F. Fernex s'est aperçu que le sédiment de 1987 présentait une faible teneur en produits azotés, tandis qu'ils étaient abondants dans celui de 1990. Or le printemps 1987 a été marqué par un développement de populations de petits crustacés (copépodes) se nourrissant du plancton végétal. Ces petits crustacés produisent des pelotes fécales microscopiques, légères, qui ne plongent pas et sont recyclées avant d'atteindre le fond. En revanche, en 1990, la population de copépodes ne s'est pas développée, car les salpes, particulièrement nombreuses, ont consommé tout le plancton végétal, pourtant abondant au printemps. Leurs pelotes fécales, riches en azote, ont rapidement atteint le fond, augmentant cette année-là la quantité d'azote dans les sédiments.

Des études plus récentes ont permis de préciser le rôle des salpes dans le cycle du carbone. L'océan joue un rôle majeur dans ce cycle en absorbant le dioxyde de carbone de l'atmosphère. À sa surface, le phytoplancton utilise ce carbone pour se développer, avant d'être consommé par le zooplancton et autres animaux. Puis le carbone est rejeté dans l'océan sous forme de matière fécale, ou lorsque l'animal meurt. En général, le carbone se dissout dans l'océan, où soit il est réutilisé par les plantes, soit il s'échappe dans l'air sous forme de dioxyde de carbone. En tom-

bant dans le fond marin, les pelotes fécales des salpes alimentent une autre voie, rapide et directe, de recyclage du carbone. En 2009, d'après les mesures de vitesse de défécation de *Salpa thompsoni* effectuées lors de deux croisières à l'Ouest de la péninsule Antarctique en 2004 et 2006, L. Madin et ses collègues ont calculé qu'une population dense de ces salpes, représentant plus de 400 milligrammes par mètre carré de carbone, produit environ 20 milligrammes de carbone par mètre carré et par jour *via* sa matière fécale. Si une partie est mangée, la majorité de cette matière fécale atteint le fond marin, où elle rejoint la couche sédimentaire. Cette couche stocke le carbone en se minéralisant.

Par la taille de leurs « essaims », les salpes, lorsqu'elles meurent, contribuent probablement aussi de façon non négligeable à la fossilisation du carbone dans les sédiments. C'est ce que suggère la découverte de plusieurs dépôts de thaliacés dans les fonds marins durant les dernières décennies, notamment en 2009 par Mario Lebrato, de l'Institut Leibniz de science marine, à Kiel en Allemagne, et ses collègues. Les sal-

pes ayant peu ou pas de prédateurs, leurs dépouilles tombent au fond des océans, où les produits de leur décomposition se minéralisent. Les biologistes ont mesuré que les tissus des thaliacés des dépôts trouvés contenaient un tiers de carbone en poids.

Aujourd'hui, plusieurs équipes dans le monde étudient les caractéristiques des « essaims » de salpes – leur taille, les conditions de leur développement, leur vitesse de croissance en fonction de la température ou de la quantité de phytoplancton disponible, leur évolution selon les saisons – afin de préciser leur impact sur l'écosystème marin. Pourquoi les salpes prennent-elles le dessus certaines années ? Comment régulent-elles leur activité reproductive en fonction de la nourriture disponible ? Peut-on évaluer la quantité de carbone stocké grâce à elles ? De nombreuses questions entourent encore ces organismes, dont même les mécanismes internes n'ont pas livré tous leurs secrets : le mécanisme permettant une production du filet muqueux continue et adaptée à la quantité de nourriture disponible n'a toujours pas été élucidé... ■

■ BIBLIOGRAPHIE

J. D. Everett *et al.*, Three-dimensional structure of a swarm of the salp *Thalia democratica* within a cold-core eddy off southeast Australia, *J. of Geophys. Res.*, vol. 116, C12046, 2011.

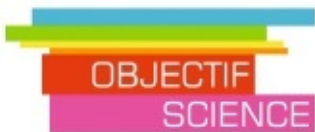
K. R. Sutherland *et al.*, Filtration of submicrometer particles by pelagic tunicates, *PNAS*, doi: 10.1073/pnas.1003599107, 2010.

B. Phillips *et al.*, Defecation by *Salpa thompsoni* and its contribution to vertical flux in the Southern Ocean, *Mar. Biol.*, vol. 156, pp. 455-467, 2009.

Q. Bone *et al.*, Tunicate feeding filters, *J. Mar. Biol. Ass. U.K.*, vol. 83, pp. 907-919, 2003.

Q. Bone (sous la dir.), *The Biology of Pelagic Tunicates*, Oxford University Press, 1998.

G. Seguin et J.-C. Braconnot, *Le plancton*, PUF, 1997.



**OBJECTIF
SCIENCE**

L'association Objectif Science
pour la promotion des sciences et de la technologie
vous propose

Communication offerte par



**POUR LA
SCIENCE**

Vous avez entre 14 et 20 ans
Vous aimez les sciences et la technologie

Participez au concours



Concours sur projet organisé par Sciences à l'École
en partenariat avec la fondation C.Génial





Finale nationale
Palais de la Découverte, Paris

Date limite d'inscription : 16 novembre 2012

Renseignements : www.objectifscience.org

L'astronomie en ballon

Françoise Delcelier-Douchin

L'arsenal des astronomes ne se limite pas aux télescopes terrestres et spatiaux. Les ballons stratosphériques permettent aussi de réaliser des observations précises.

M. Janssen avait prêté à Crocé-Spinelli un petit spectroscopie, en lui indiquant les points à observer. Il s'agissait surtout de savoir ce que devenaient, dans les hautes régions, les deux bandes obscures qui se trouvent à droite et à gauche de la double raie du sodium et qui sont celles de la vapeur d'eau. M. Janssen, qui leur attribue une origine terrestre, pensait que si l'on s'élevait suffisamment haut dans l'atmosphère pour laisser au-dessous de soi presque toute la vapeur d'eau, les bandes devaient devenir tout à fait invisibles.

L'Aéronaute, 1874

Cet extrait de journal publié en mai 1874 décrit la première expérience d'astronomie en ballon conduite à Bar-sur-Seine par les Français Joseph Crocé-Spinelli et Théodore Sivel à bord de l'*Étoile Polaire*. Ces pionniers de l'astronomie en ballon voulaient savoir si l'atmosphère altère les observations du Soleil et des étoiles effectuées depuis le sol. Ils mirent en évidence des effets perturbateurs : certaines longueurs d'onde sont absorbées par l'épaisse couche d'air, et des turbulences empêchent d'obtenir des images nettes. Crocé-Spinelli et Sivel démontraient ainsi l'intérêt de l'astronomie en ballon : en réalisant les observa-

tions au-dessus de l'atmosphère, on éviterait ces perturbations. Mais, en 1875, les deux Français moururent d'hypoxie – un manque d'oxygène – lors d'un vol ayant atteint 8600 mètres d'altitude.

Malgré cet accident, les astronomes ont continué à utiliser les ballons pour étudier le ciel. En 1912, l'Autrichien Victor Hess découvrit l'origine des rayons cosmiques lors de mesures en ballon. Il fut récompensé par le prix Nobel de physique en 1936 pour ces observations, ouvrant la voie à l'étude des astroparticules, domaine de recherche qui utilise, encore aujourd'hui, des ballons pour transporter des instruments de mesure à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude.

Les ballons modernes utilisés pour les expériences scientifiques n'emportent plus d'équipage et sont contrôlés depuis le sol, mais le principe reste le même : une enveloppe de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes enferme un gaz plus léger que l'air. Une nacelle, contenant des instruments de mesure, est accrochée à des sangles reliées au ballon. Divers progrès réalisés depuis les premiers ballons permettent d'assurer des vols à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude, sur des durées plus longues

L'ESSENTIEL

- Les ballons peuvent emporter à plusieurs dizaines de kilomètres d'altitude des instruments scientifiques. Ils offrent la possibilité de faire des mesures d'astronomie de qualité.
- L'expérience PILOT, prévue pour 2013, étudiera le rayonnement diffusé par les poussières galactiques.
- Les missions en ballon présentent une grande fiabilité, une souplesse et une simplicité des opérations de lâcher ainsi qu'une grande complémentarité avec les missions spatiales.

CNRS