

Des cires pour survivre*

par J. R. Sargent

(Natural Environment Research Council,
Institute of Marine Biochemistry, Aberdeen)

Le zooplancton constitue un maillon vital de la chaîne alimentaire dont dépendent beaucoup les poissons que nous pêchons. De façon à survivre pendant les hivers arctiques, ces minuscules animaux constituent une réserve d'huile, renfermant surtout des cires, qui peut être considérée comme l'une des principales formes des composés du carbone associés à la vie. Il faut être conscient de l'imprudence qu'il y aurait à vouloir exploiter directement le plancton, car la chaîne alimentaire marine semble être plus efficace, surtout au niveau écologique, que toute autre voie d'utilisation de ces ressources.

En dépit de la richesse en espèces marines animales et végétales qui vivent en interrelations complexes, la chaîne alimentaire marine fondamentale est très simple. La production primaire est photosynthétique; elle résulte en l'apparition de formes minuscules de la vie végétale : le phytoplancton. Ce phytoplancton sert d'aliment au zooplancton, lequel est à son tour absorbé en grandes quantités par de nombreuses espèces de poissons présentant un intérêt commercial. Les harengs, sprats, menhadens, capelans, sardines, pilchards, anchois, merlans bleus, maquereaux et jeunes saumons, dépendent tous pour une bonne part du zooplancton, en ce qui concerne leur alimentation. A ce groupe, on peut aussi rattacher les baleines.

On sait depuis longtemps que de nombreux animalcules du zooplancton sont exceptionnellement riches en lipides, ou en huile, mais ce n'est que depuis la fin des années soixante que l'on a commencé à réaliser que l'huile du zooplancton a une composition inhabituelle, si l'on se réfère aux standards valables pour les mammifères. Les graisses et les huiles que l'on trouve dans la plupart des vertébrés terrestres et marins sont essentiellement composées de triglycérides, dont la structure est représentée sur la figure 1a; par contraste, les huiles des invertébrés du zooplancton renferment principalement des cires esters ou cérides, schématisés sur la figure 1b. Chez les plantes et les animaux terrestres, il y a

Analyse et distribution

Au cours des dernières années, de nombreuses analyses de cérides marins ont conduit à la conclusion que la partie alcool des esters était relativement simple. Chez la plupart des constituants du zooplancton, il s'agit soit de composés saturés à 14 ou 16 carbones, ou de composés monoinsaturés, dont une seule des 20 ou 22 liaisons disponibles n'est pas occupée par l'hydrogène (20 : 1, 22 : 1). La partie acide gras des cérides tend à être plus complexe et reflète invariablement l'alimentation de l'animal. Par exemple, les acides gras polyinsaturés qui se forment dans le phytoplancton ne se retrouvent que dans la fraction acide gras des esters du zooplancton.

* De Spectrum 143.

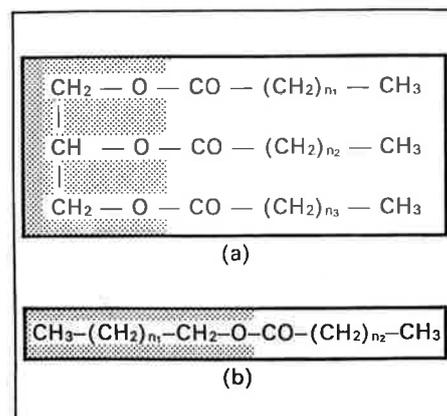


Figure 1.

a) Molécule de triglycéride, formée par trois molécules d'acides gras estérifiées pour une molécule de glycérol.

b) Molécule d'ester de cire (céride) consistant en une molécule d'acide gras estérifiée pour une molécule d'alcool gras; l'alcool gras est lui-même formé par réduction biochimique d'un acide gras. Le triglycéride possède trois liaisons ester pour trois chaînes alkyl. Comme le céride n'a qu'une liaison ester pour deux chaînes alkyl, il est considérablement plus hydrophobe que le triglycéride.

formation de petites quantités de cires afin de lubrifier ou d'imperméabiliser certaines surfaces; cette formation peut avoir lieu dans les glandes de certains oiseaux, dans les téguments d'insectes et dans la peau de certains fruits, de certaines plantes et de certains animaux, dont l'homme. Des dépôts plus importants de cérides sont rencontrés dans la tête des baleines, des marsouins et des dauphins où l'on pense qu'ils servent de lentilles acoustiques dans la biosonar de ces animaux. Cependant, il semble que les dépôts très abondants de cérides fluides, qui constituent les réserves énergétiques du zooplancton, soient uniques en leur genre.

A partir de travaux analytiques, l'idée s'est fait jour que de nombreuses espèces de zooplancton synthétisent des quantités anormalement élevées de cérides dans des conditions d'environnement telles que la nourriture ne soit abondante que durant une courte période suivie d'une durée prolongée où elle se raréfie. Dans l'Arctique et l'Antarctique, par exemple, un bref été permet une photosynthèse intense accompagnée de la formation de produits primaires, ensuite il y a un hiver prolongé pendant lequel la nourriture manque pour les herbivores.

Près des trois quarts du poids sec de *Calanus hyperboreus*, un copépode typique de l'Arctique, sont constitués de cérides,

alors que certains euphausiides de l'Antarctique tels que *Euphausia crystallophias* et une des espèces *Thysanoessa* peuvent renfermer des cérides jusqu'à concurrence de la moitié de leur poids sec. En revanche, le « krill » commun de l'Antarctique : *Euphausia superba* qui vit au nord de la banquise, ne renferme pas de cérides en quantités significatives. L'énorme biomasse du zooplancton océanique et sa teneur élevée en cérides signifient que ces lipides relativement simples peuvent être rangés parmi les formes principales de composés du carbone associés à la vie. On a estimé

à 3×10^8 tonnes au moins, la quantité de cérides produits annuellement par le zooplancton océanique.

Nous pensons que le mécanisme de bio-synthèse de ces cérides peut produire des quantités impressionnantes de substances énergétiques de réserve en un temps relativement court. A cause de ceci, le zooplancton qui se nourrit de phytoplancton et synthétise des cérides, excrète des quantités importantes d'ammoniac provenant de la décomposition d'acides aminés. Le phytoplancton renferme des quantités assez

abondantes d'hydrates de carbone de réserve, alors qu'il y en a peu dans le zooplancton. Il semble que le zooplancton transforme principalement les hydrates de carbone et les protéines en alcools gras qui seront incorporés dans les cérides alors que les acides gras qui proviennent des triglycérides du phytoplancton constituent l'essentiel de la fraction acide gras des cérides. Ceci rend bien compte du fait que les alcools gras qui entrent dans la composition des cérides sont de structure assez simple, avec des chaînes alkyl qui peuvent être synthétisées par la plupart des animaux.

Zooplancton et prédateurs

Les cérides sont produits pour permettre au zooplancton de survivre dans un environnement défavorable. Des quantités non négligeables de ces lipides sont utilisées pour permettre au zooplancton jeune ou adulte de survivre aux privations de nourriture durant le long hiver, cependant la partie la plus importante des réserves lipidiques est utilisée au cours de la reproduction. De nombreuses espèces de zooplancton, dont *Euchaeta norvegica* produisent des œufs riches en cérides. D'autres, et en particulier *Calanus finmarchicus*, transforment d'abord leurs cérides en triglycérides dont ils transfèrent ensuite des quantités importantes dans leurs œufs. Une telle transformation, effectuée également par les poissons, peut représenter un mécanisme de mobilisation d'une réserve lipidique qui, autrement, serait assez inerte du point de vue métabolique, en raison de sa nature extrêmement hydrophobe. Les lipides des œufs du zooplancton sont utilisés au cours du développement de l'embryon et de la larve, jusqu'à ce qu'elle puisse trouver sa propre nourriture. Le

développement et l'apparition d'animaux pouvant trouver leur nourriture eux-mêmes sont synchronisés avec le début de la formation du phytoplancton, au printemps.

En aucun cas il n'y a survie et reproduction de tous les animalcules constituant le zooplancton. Une quantité très importante sert à la nourriture des poissons prédateurs et des baleines, comme nous l'avons déjà mentionné. Comme le zooplancton consiste presque entièrement en cires et en protéines, les prédateurs ont donc alors un régime différent. En fait, les poissons marins ne conservent pas dans leur corps les cérides, sans les modifier; ils les transforment, dans leur intestin, en triglycérides. Comme leur nourriture ne renferme pas de glucose, les poissons synthétisent le glycérol à partir des acides aminés ingérés sous forme de protéines. La fraction acide gras des triglycérides provient à la fois des alcools gras et des acides gras des cérides. Il semble évident qu'il doit y avoir un couplage entre la réduction qui donne naissance au glycérol et l'oxydation qui donne nais-

sance aux acides gras. Ainsi, de même que les alcools gras 20 : 1 et 22 : 1 prédominent dans les cérides de *Calanus finmarchicus*, de même il y a prééminence des acides gras 20 : 1 et 22 : 1 dans les triglycérides de son prédateur, le hareng *Clupea harengus*.

Tout ceci signifie qu'il y a des inter-relations entre protéines et lipides dans la chaîne alimentaire marine. L'avantage de survie que le zooplancton retire de ses cérides est obtenu au prix de la décomposition de quantités importantes de protéines, présentes à l'origine dans le phytoplancton. Lorsque les poissons utilisent les cérides, alors ils ne consomment qu'une quantité relativement faible de protéines zooplanctoniques. Il est évident que ces processus biochimiques ont une importance fondamentale dans l'efficacité totale de la chaîne alimentaire marine, surtout en ce qui concerne le rendement en protéines; cependant, nous ne sommes encore qu'au début de la description quantitative du phénomène.

Nappes et formation sédimentaires huileuses

Nous savons maintenant que tous les cérides synthétisés par le zooplancton ne sont pas consommés par ce dernier ou par ses prédateurs. Des nappes huileuses rouges,

constituées principalement de cérides et du pigment astaxanthine qui se trouve dans le zooplancton et provient des pigments phytoplanctoniques, ont été traditionnelle-

ment associées aux bancs de harengs et de sprats en pleine activité alimentaire. Il est vraisemblable que la plus grande partie des substances qui forment de telles

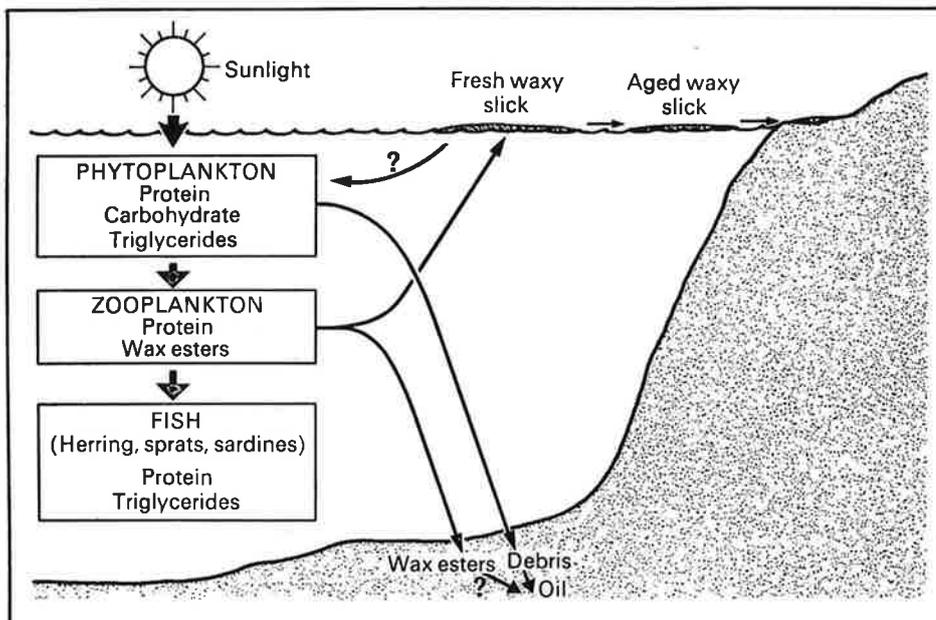
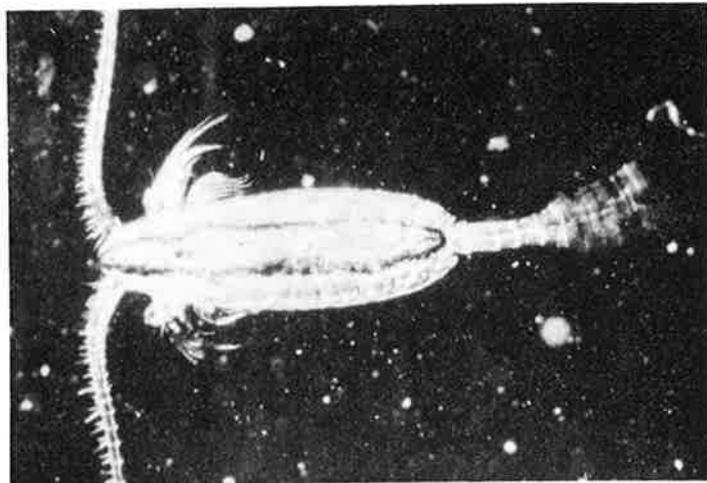
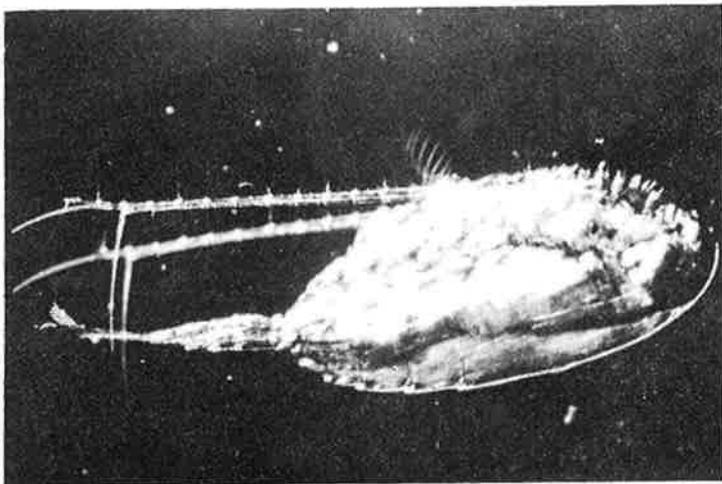


Figure 2.

Les cérides dans une chaîne alimentaire marine simple. Ils sont uniquement produits par le zooplancton et, dans une large mesure, transformés en triglycérides par le poisson. Des quantités significatives de cérides peuvent être libérées par le zooplancton pour venir former des nappes d'huile à la surface, mais nous ignorons encore ce qu'il en advient. Une certaine quantité de cérides peut également se déposer dans des sédiments jeunes, au-dessous des zones à forte productivité en zooplancton. Ces lipides peuvent être d'importants précurseurs de dépôts d'hydrocarbures marins.

Sunlight	Lumière du soleil
Fresh waxy slick	Nappe d'huile fraîche
Aged waxy slick	Nappe d'huile ancienne
Phytoplankton	Phytoplancton
Protein	Protéine
Carbohydrates	Hydrate de carbone
Triglycerides	Triglycérides
Zooplankton	Zooplancton
Protein	Protéine
Wax esters	Cérides
Fish	Poisson
(Herring, sprats, sardines)	(Harengs, sprats, sardines)
Protein	Protéine
Triglycerides	Triglycérides



Espèces typiques de zooplancton des régions tempérées du Nord. A gauche : le copépode calanoïde *Calanus finmarchicus* rencontré en grande abondance dans la partie septentrionale de la mer du Nord. L'animal a environ 1 mm de long. A droite : le copépode calanoïde *Euchaeta norvegica* qui abonde dans certains lochs écossais de la côte ouest, dont le Loch Etive et le Loch Fyne ; il mesure 5 mm de long. Tous deux sont caractérisés par de larges poches d'huile situées en position centrale, parallèlement à l'intestin. Cette huile est constituée de cérides. (Photographies de S. George Institute of Marine Biochemistry, Aberdeen).

nappes provient des nuages de zooplancton, par broyage des animalcules lorsque le poisson s'en nourrit.

Les intestins de harengs ou de jeunes saumons ayant une activité alimentaire élevée, renferment de nombreuses gouttelettes d'huile en cours d'absorption. L'huile extraite de poissons entiers renferme des quantités importantes de cérides qui dérivent entièrement du contenu de leurs intestins et de leurs estomacs. Les déjections de ces poissons renferment, elles aussi, des quantités non négligeables de cérides, ce qui montre que l'assimilation est incomplète. La très faible densité de ces esters, qui présentent une densité d'environ 0,9 et leur nature très hydrophobe (ils ne forment pas de couche stable entre l'air et l'eau) fait que lorsqu'ils sont libérés par le zooplancton, ils apparaissent rapidement à la surface pour former des nappes d'huile stables. En 1974, dans le nord-est du Pacifique, on a repéré une de ces nappes

dont la surface était d'au moins 150 km². Sa couleur orange indiquait qu'elle était récente et, en outre, elle renfermait des restes identifiables de zooplancton. Les principaux constituants de cette huile étaient des cérides renfermant une forte proportion d'alcools gras 20 : 1 et 22 : 1.

L'action des prédateurs n'est sans doute pas la seule cause de la présence de nappes d'huile naturelles à la surface de la mer. En Colombie britannique, sur les plages de Bute Inlet, on trouve souvent des amas de substances cireuses qui consistent essentiellement en cérides à forte teneur en alcools gras 20 : 1 et 22 : 1 et en acides gras 14 : 0 et 16 : 0. On pense que ces substances correspondent à une forme ancienne de cérides libérés soudainement et massivement par du zooplancton local peut-être à cause d'une baisse rapide et inhabituellement forte de la température. Nous savons que dans la même zone

climatique, dans le fjord de Tromsø en Norvège, on trouve souvent des substances analogues, qui n'ont pas encore été analysées.

En juin 1975, en mer du Nord, on a repéré une nappe de près de 80 km² qui présentait la particularité intéressante de ne renfermer que deux types d'esters constitués l'un et l'autre par l'association d'un acide gras 14 : 0 avec des alcools gras 20 : 1 et 22 : 1. L'astaxanthine et les acides gras polyinsaturés facilement oxydables étaient totalement absents de cette nappe indiquant un vieillissement impossible à préciser. Une particularité supplémentaire était qu'elle ne renfermait pas d'hydrocarbures minéraux détectables, ce qui indiquait que l'extraction réalisée par ce volume important de cérides naturels pendant des jours et probablement des semaines n'avait pas réussi à piéger les hydrocarbures minéraux normalement présents, en raison de l'intense activité industrielle régnant dans ce secteur.

Causes ignorées

L'origine de toutes les nappes huileuses mentionnées précédemment semble être le zooplancton marin car elles renferment toutes les alcools gras 20 : 1 et 22 : 1, sous forme d'esters, et que ces alcools gras sont caractéristiques des cérides du zooplancton. Cependant la cause de la formation de ces nappes demeure inconnue. L'activité nutritive intense des poissons peut être une cause, de même que de brusques changements de température, qu'il s'agisse de hausses ou de baisses. La pollution, sous une forme encore inconnue, pourrait également être à l'origine de ces nappes, et il a même été suggéré que des nappes âgées pourraient provenir de dépôts sous-marins de cérides.

Nous ignorons en outre ce que deviennent finalement ces nappes, bien qu'il semble probable que les cérides soient recyclés dans la chaîne alimentaire marine par l'intermédiaire de micro-organismes. Dans un tel contexte, le fait que l'on prétende que le film superficiel naturel qui recouvre les océans renferme des alcools et des acides gras, ne manque pas d'intérêt, car

ces composés dérivent sans doute de l'hydrolyse des cérides. Il est également possible que ces substances proviennent du lavage par la mer des plages les plus proches.

L'une des destinations finales des esters du zooplancton, que nous avons récemment identifiée dans notre laboratoire, semble être les sédiments marins. Certains de ces sédiments que l'on trouve sous les zones à forte concentration en phytoplancton et zooplancton renferment de petites quantités de cérides. Cependant les cérides n'y ont pas été rencontrés en quantités telles qu'elles puissent expliquer la formation des nappes superficielles. Les cérides sédimentaires sont nettement plus complexes que ceux du zooplancton et, jusqu'à présent, nous n'avons identifié que la moitié de leurs constituants. La présence des alcools gras 20 : 1 et 22 : 1 caractéristiques du zooplancton indique, ici aussi, que la plus grande partie des esters doit provenir du zooplancton. La complexité de ces esters suggère cependant que les lipides qui se sont déposés à l'origine ont dû subir une trans-

formation bactérienne ou géochimique ultérieure.

On ignore ce qu'il advient des cérides sédimentaires. Il pourrait y avoir un recyclage par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire des animaux sédentaires et de la vie végétale du fond des mers, mais ceci semble improbable pour les esters que nous avons détectés dans des couches solides de plus d'un mètre d'épaisseur. Une possibilité évidente est que les esters déposés dans les sédiments marins subissent une transformation géochimique conduisant, dans certains cas, à la production d'hydrocarbures minéraux. Il faut remarquer que les théories sur la formation du pétrole, développées avant que l'on ait réalisé de façon générale l'importance des cérides marins, impliquent les constituants du phytoplancton et des bactéries marines comme précurseurs majeurs des hydrocarbures du pétrole. On a également supposé que les cires des végétaux terrestres entraînées par l'eau de mer pouvaient être des précurseurs du pétrole sous-marin. Alors que les principales substances biochimiques,

à savoir les protéines, les hydrates de carbone et les graisses, peuvent toutes être transformées en hydrocarbures minéraux par de simples expériences de chauffage, au laboratoire, simulant les conditions géochimiques, il semble vraisemblable que les lipides soient les précurseurs préférentiels des hydrocarbures minéraux car la longueur des chaînes de ces derniers correspond

à celle des acides gras des cérides. De même que les autres lipides, les cérides peuvent être facilement et efficacement transformés en hydrocarbures minéraux par chauffage à 250 °C, pendant une à deux semaines en présence d'argile. De ceci résulte l'axiome suivant : les conditions de production primaire marine intensive qui seraient nécessaires pour satisfaire les théories sur la

formation du pétrole devraient être accompagnées d'une production secondaire intensive conduisant à la formation de quantités importantes de cérides. Pour cette raison, ajoutée à la découverte de cérides dans de nouveaux sédiments, nous pensons que les cérides du zooplancton sont très vraisemblablement les précurseurs de certains dépôts marins d'hydrocarbures.

Exploitation du zooplancton

Peut-on envisager d'exploiter les cérides marins? Les lipides sont, en théorie tout au moins, une source potentielle supplémentaire d'énergie chez les animaux et même dans la nourriture humaine. Le krill, constitué principalement d'*Euphausia superba*, est déjà exploité sur une grande échelle par certains pays, principalement pour ses protéines; cependant, il est probable que les cérides pourraient être un sous-produit non négligeable, surtout si l'on récolte le krill plus près de la banquise, là où il renferme les espèces les plus riches en cérides. Il restera ensuite à voir si ce type d'exploitation peut être étendu à d'autres espèces zooplanctoniques, ce que nous pensons peu souhaitable. En effet, pour les raisons que nous avons exposées, le zooplancton et les cérides qu'il renferme ont une importance fonda-

mentale dans la chaîne alimentaire marine. Une exploitation intensive du zooplancton serait donc imprudente car nous n'avons pas encore une connaissance approfondie des implications qu'elle pourrait avoir sur la vie marine, en général. Sur un plan plus particulier, nous ne pensons pas qu'un schéma, quel qu'il soit, pour l'utilisation de produits zooplanctoniques en agriculture conventionnelle, par exemple pour nourrir des bœufs, présente une efficacité écologique supérieure à celle des processus qui fonctionnent dans la mer, surtout si l'on devait utiliser les lipides marins pour l'alimentation animale. Il serait surprenant de constater que les poissons qui se nourrissent de zooplancton n'ont pas mis au point des mécanismes biochimiques particulièrement efficaces pour transformer les quantités importantes de cérides qu'ils ingèrent.

En revanche, la production de zooplancton par une culture basée sur une production photosynthétique de phytoplancton échappe à ces critiques et semble être une source d'aliments zooplanctoniques beaucoup plus logique.

En dehors de ces objectifs, l'attention va continuer à se concentrer sur les facteurs qui déterminent l'efficacité de la chaîne alimentaire marine, spécialement aux étapes intermédiaires entre photoplancton et zooplancton d'une part, puis zooplancton et poisson de l'autre. Dans une large mesure, ceci revient à considérer la formation et l'utilisation des cérides. La mesure dans laquelle la chaîne alimentaire marine dépend de ces lipides signifie qu'il y a beaucoup de recherches à faire dans ce domaine au cours des années à venir.