

# Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France

## Academic Notes of the French Academy of agriculture

### Authors

Serge Poulet

### Title of the work

Tératogenèse induite par les diatomées : un modèle d'interaction proie-prédateur transgénérationelle  
Year 2016, Volume 2, Number 8, pp. 1-11

### Published online:

14 November 2016,

<https://www.academie-agriculture.fr/publications/notes-academiques/n3af-editorial-pourquoi-levaluation-par-les-pairs-simpose-why-peer>

<https://doi.org/10.58630/pubac.not.690522>

[Tératogenèse induite par les diatomées : un modèle d'interaction proie-prédateur transgénérationelle](#)

© 2016 by Serge Poulet is licensed under [Attribution 4.0 International](#) 

## Synthèse

# Tératogénèse induite par les diatomées : un modèle d'interaction proie-prédateur transgénérationnelle

## *Diatom-induced teratogenesis: a model of transgenerational prey-predator interaction*

**Serge Poulet**

*Directeur de recherche émérite au CNRS, Station Biologique de Roscoff (CNRS-Université Pierre et Marie Curie Paris), 29680 Roscoff, France*

**Correspondance :**  
[sergepoulet2@orange.fr](mailto:sergepoulet2@orange.fr)

### Résumé :

Un mode de défense chimique original existe chez les diatomées. Il est fondé sur la production de petites chaînes d'acides gras, à partir des acides arachidonique et eicosapentaénoïque comme précurseurs, comprenant une série d'aldéhydes polyinsaturés toxiques de 7 à 12 atomes de carbone, dont la production est provoquée instantanément par une cascade enzymatique, dès la rupture des frustules par les mandibules des copépodes. Durant le transit intestinal, ces aldéhydes s'accumulent dans les ovaires et induisent une série d'anomalies cellulaires, observées au cours de l'ovogenèse, de l'embryogenèse et de la morphogenèse larvaire. Elles provoquent la stérilisation des femelles et la mort des juvéniles, selon une relation dose-réponse. La toxicité des aldéhydes impliqués dans ce type de défense chimique, n'affecte pas la survie des femelles, ni celle des mâles. Ce mécanisme de défense opère à retardement, et constitue un modèle d'interaction proie-prédateur trans-générationnelle.

### Abstract:

Polyunsaturated aldehydes produced by diatoms species are ingested by female copepods and tend to accumulate in their gonads. These small molecules induce several lethal teratogenic effects on copepods in comparison to aldehydes free diatom in control diets. Cell anomalies are observed in gonads, embryos and larvae. They induce several lethal effects, including the decline of spawning rates and sterilization of females in few days. Embryogenesis is deeply disturbed as well as morphogenesis in larvae. Consequently, hatching rates decline, or mortality of larvae increases. These responses are dose-dependent and reversible. They illustrate an interesting predator-prey model among planktonic organisms. They also show that diatom species have evolved a very sophisticated chemical defense mechanism against copepods, one of their major predators.

## Synthèse

### Keywords:

Diatom-copepod interactions, inhibitory aldehydes

### Mots clefs :

Interactions diatomées-copépodes, aldéhydes toxiques

### Introduction

Les diatomées sont connues par un large public pour différentes raisons. Rappelons que d'importants dépôts sédimentaires, riches en diatomées, se sont constitués à partir de l'ère secondaire, dès le Jurassique et au cours du Crétacé. Ce qui témoigne d'une longue existence, d'une permanente adaptation et d'une remarquable résilience de la part de ces organismes, au cours de l'évolution. La roche ainsi formée, connue sous le nom de diatomite, est constituée des frustules siliceuses fossilisées (structure bivalve renfermant la cellule des diatomées), dont les propriétés spécifiques sont utilisées dans l'industrie en tant qu'agent de filtration et de clarification du vin, comme abrasifs pour le polissage des verres de lunettes, ou comme additifs dans divers produits industriels, telles les peintures, ou entrant dans la fabrication de la dynamite comme stabilisateur de la nitroglycérine.

Enfin, la renommée des diatomées est aussi liée au fait qu'elles sont à l'origine de la formation de certains pétroles fossiles. Dans les domaines de la biotechnologie, elles font partie des micro-algues, candidates potentielles pour la fabrication de futurs biocarburants renouvelables (Daboussi *et al.*, 2014). Elles constituent une source naturelle d'acides gras polyinsaturés, de pigments et d'antioxydants utilisables dans divers produits alimentaires et cosmétiques (Bozarth *et al.*, 2009 ; Scaife et Smith, 2016).

Aujourd'hui on connaît environ 100 000 espèces de ces micro-algues. Elles sont remarquables en raison de l'extraordinaire

diversité de la forme, de l'ornementation et de l'ultrastructure de leur frustule siliceuse, en raison de leur diversité génétique, et, aussi, en raison de leurs caractéristiques chimiques, biologiques et écologiques.

Unicellulaires ou coloniales, les espèces occupent, en zone photique, tous les écosystèmes benthiques ou pélagiques connus. Certaines espèces prolifèrent rapidement, selon certaines conditions physico-chimiques favorables du milieu, formant parfois des efflorescences de tailles gigantesques, détectées, mesurées et suivies en mer par les satellites de télédétection. Elles constituent une des composantes majeures du phytoplancton marin et d'eau douce (Field *et al.*, 1998). A ce titre, elles ont un intérêt pratique pour l'évaluation de la qualité de l'eau potable et de la contamination par les pesticides, ou herbicides, des cours d'eau, en France et dans le monde (Rimet et Bouchez 2011 ; Stevenson *et al.*, 2010). En agriculture, des expériences ont démontré le rôle de pesticide naturel de la poudre de diatomite (Islam *et al.*, 2010). Les diatomées jouent aussi un rôle clé en conchyliculture, constituant une fraction importante de l'alimentation des mollusques filtreurs, telles que huîtres et moules, cultivées en milieu naturel ou sous forme larvaire en éclosion (Pernet *et al.*, 2012).

Enfin les diatomées constituent un des chaînons primaires de la chaîne trophique marine, comptant à l'échelle globale pour 40 % de la productivité végétale annuelle, pour 25 % de la fixation du carbone, et pour 20 % de la génération d'oxygène généré (Field *et al.*, 1998). Dans les écosystèmes pélagiques, une partie variable de cette production organique sédimente, poursuivant ainsi la formation de nouveaux sédiments marins, tandis qu'une autre fraction est utilisée en tant que ressource alimentaire par une multitude d'organismes planctoniques, appartenant au chaînon secondaire du réseau trophique. A ce niveau, un groupe particulier de crustacés planctoniques microscopiques

## Synthèse

occupe une position clé dans les écosystèmes pélagiques. Il s'agit des copépodes.

Ces organismes sont capables de capturer des proies dans une très large gamme de tailles (5  $\mu\text{m}$  à quelques centaines de  $\mu\text{m}$ ), issues de groupes taxonomiques, végétaux ou animaux, extrêmement variables, changeant en fonction de facteurs environnementaux, saisonniers, ou selon le caractère aléatoire des répartitions spatiales des copépodes et de leurs proies, coexistant dans un même milieu. Les diatomées constituent une fraction prépondérante des proies végétales entrant dans le régime de ces crustacés.

Jusque dans les années 1990, et selon un paradigme dominant à l'époque, les diatomées étaient considérées comme le maillon végétal essentiel, assurant une ration régulière en énergie, selon un rapport de rendement théorique égale à 1/10 (Jennings et Collingridge, 2015). C'était sans compter sur les aspects plus subtils des interactions proies-prédateurs, des phénomènes comportementaux, des agents de communications chimiques, des phénomènes d'exclusion et, plus récemment, de la découverte de nouvelles toxines phytoplanctoniques (Pohnert et Boland, 2002 ; Pohnert, 2004).

En explorant ces nouveaux domaines de l'océanographie biologique, des observations ont progressivement repoussé les limites classiques des connaissances sur le fonctionnement de l'écosystème marin, à l'interface diatomée-copépode. Notamment l'action tératogène exercée par les diatomées sur les copépodes qui s'en nourrissent a été découverte (Miralto *et al.*, 1999). Dans les écosystèmes pélagiques océaniques, il n'existe pas de refuges permettant à une proie de se cacher de son prédateur, à l'inverse des milieux benthiques ou terrestres. Les stratégies d'évitement acquises par les diatomées vis-à-vis de leurs principaux prédateurs, les copépodes, reposent donc sur des facteurs physiques et chimiques.

Dans les paragraphes suivants, les différents

aspects de ces interactions proie-prédateur, sont abordés du point de vue mécanique, chimique et ontogénique.

### 1. La co-évolution proie-prédateur : une vieille histoire de morphologie et de mécanique

Les copépodes et les diatomées ont co-évolué de façon parallèle. Les premiers ont une carapace et des pièces mandibulaires segmentées et articulées, constituées de chitine, comme chez tous les crustacés. Cependant, chez les copépodes, la chitine trop flexible des pièces buccales ne permettrait pas de broyer les diatomées, protégées par des frustules siliceuses, rigides et particulièrement résistantes à la pression des dents de ces micro-crustacés.

En effet, à l'échelle microscopique où opèrent les pièces buccales des copépodes, une pression équivalente de 100 à 700 tonnes/m<sup>2</sup> doit être exercée pour parvenir à faire éclater une cellule de diatomée (Hamm *et al.*, 2003). Pour réussir ce tour de force, les mandibules des copépodes sont munies, à leurs extrémités, de dents acérées, recouvertes d'une mince couche de silice, très résistante et rigide. Cette adaptation spécifique constitue un cas unique de métabolisation et d'utilisation de la silice dans le règne animal, mises à part les éponges.

En contrepartie, les diatomées ont des stratégies complémentaires à la résistance physique de leurs frustules pour se défendre contre la prédation. Pour ces algues, on connaît deux autres types de processus de défense. Le premier agit sur la miniaturisation de la taille cellulaire, chez les espèces unicellulaires ; ou, inversement, l'augmentation de la longueur des chaînes de cellules chez les diatomées coloniales. Le second processus concerne la présence d'ornementations sur chaque cellule, constituées de nombreux et très longs spicules siliceux protecteurs.

## Synthèse

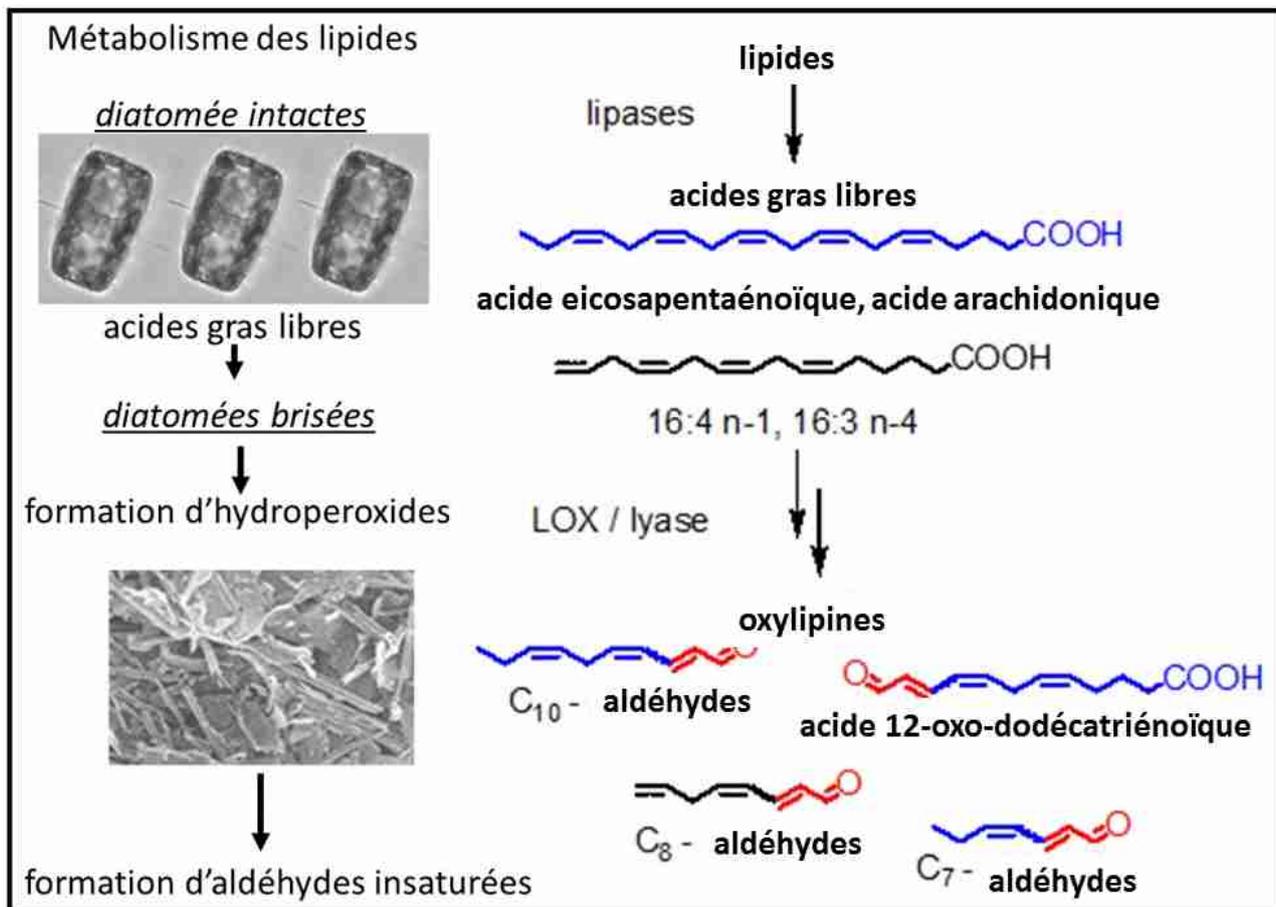


Figure 1. Différentes étapes de la production d'oxylipines par les diatomées. La formation d'aldéhydes toxiques en C7-C12, à partir de précurseurs lipidiques (acides arachidonique et eicosapentaénoïque) s'effectue selon une voie métabolique utilisant une cascade d'enzymes spécifiques (à droite). Cette voie est activée dès la rupture des diatomées par les mandibules des copépodes (à gauche). (Modifié d'après Pohnert, 2004).

Ces deux propriétés morphologiques renforcent ou provoquent soit l'inefficacité de capture des petites cellules isolées, soit l'évitement des plus longues colonies, réduisant ainsi la fréquence de mortalité cellulaire par mastication. Un autre phénomène bien connu d'échappement à la voracité du prédateur, consiste, chez les diatomées, à l'instar de la majorité des organismes phytoplanctoniques, à former des efflorescences dont la densité cellulaire entraîne un phénomène d'exclusion, soit par création d'une bulle anoxique, soit par l'émission de composés chimiques répulsifs

(diméthylsulfoxyde : DMSO ; aldéhydes poly-insaturés : PUA).

En résumé, il est concevable d'imaginer que cette interaction entre prédateurs zooplanctoniques et proies phytoplanctoniques se soit poursuivie à l'avantage des diatomées, par réduction partielle, ou massive de leur destruction par les copépodes, grâce à leurs diverses adaptations morphologique et chimique, et à leur capacité de prolifération. Indirectement ces stratégies adaptatives leur permettent de sédimenter en masse sur les fonds marins,

## Synthèse

après chaque efflorescence saisonnière, comme en témoigne l'épaisseur des couches anciennes de diatomite.

### 2. Les facteurs chimiques de défense

Depuis deux décennies, de nouveaux agents chimiques de défense ont été identifiés. Les composés à la base de ce processus de défense sont des triglycérides fabriqués en quantité par les diatomées. Par l'action successive de lipases spécifiques, ces microalgues métabolisent une série d'acides gras polyinsaturés à longues chaînes carbonées, comportant 16 à 22 atomes de carbone. Parmi ce stock, utilisé pour les besoins en énergie ou la constitution des membranes cellulaires (après transformation en phospholipides), deux acides gras libres sont importants : il s'agit des acides arachidonique (C20:4 *n*-6) et eicosapentaénoïque (C20:5 *n*-3), les deux principaux précurseurs du mécanisme de défense.

La formation d'aldéhydes est déclenchée par la transformation oxydative de ces molécules en C20 qui, en se dégradant, libèrent de nouveaux acides gras en C16, qui sont ultérieurement métabolisés par une voie impliquant successivement deux enzymes spécifiques : une lipoxigénase (LOX) et une hydroperoxydase (HDL).

Ce métabolisme conduit à une série de composés volatils, réduits à 7 - 12 atomes de carbone. Cette nouvelle série de composés polyinsaturés (décatriénal, décadiénal, heptadiénal, acide 12-oxo-dodécatriénoïque, octénal, octatriénal, octadiénal, acide 9-oxo-nonadiénoïque, dodécanal, tridécanal et heptadécanal) constitue des oxylipines (métabolites secondaires intervenant dans diverses interactions biochimiques de la communication proie-prédateur, ou allélopathie).

Ces molécules sont responsables et directement impliquées dans le processus de défense anti-copépodes. Elles sont produites

« à la demande », en quelques secondes et uniquement après blessure, ouverture et destruction mécanique des frustules ; ce qui, sous l'effet du stress cellulaire, déclenche la cascade enzymatique (Figure 1). En l'absence de prédateurs, les diatomées ne fabriquent pas ces aldéhydes, et cette voie enzymatique spécifique à leur production n'est pas initiée. Les acides gras précurseurs ainsi économisés sont stockés sous forme de réserves, particulièrement utiles et importantes pour le métabolisme cellulaire (Pohnert, 2004).

Les aldéhydes ainsi formés sont des composés extrêmement réactifs du fait de leur chaîne carbonée insaturée, comprenant 3 à 4 doubles liaisons en position  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , qui leur confèrent un fort potentiel d'accepteur de Michael (permettant la création de liaisons carbone-carbone). Cet élément structural, typique des produits secondaires de la peroxydation des lipides, leur confère des propriétés chimiques instables et une forte attraction moléculaire avec les nucléophiles, par transformation de la double liaison, ce qui est à la base de leur rôle d'éliciteur (composé capable de déclencher un mécanisme de défense). Parmi les aldéhydes identifiés chez les diatomées, le plus actif est par exemple le décadiénal, à 10 atomes de carbone. Les moins actifs sont ceux possédant plus de 9 atomes de carbone (dodécanal, heptadécanal, oxo-tridécanal) ; tandis que les chaînes courtes à 7-9 atomes de carbone ont une activité intermédiaire (heptadiénal, octadiénal, octa-trienal).

Des tests *in vitro* ont révélé que l'activité de ces petites molécules est liée à la longueur de la chaîne carbonée, au nombre et à la position relative des doubles liaisons, à leur position en  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , par rapport à l'atome d'oxygène terminal, et, à longueur de chaîne égale, au degré d'insaturation (Pohnert *et al.*, 2002 ; Adolph *et al.*, 2003). Parmi 51 espèces de diatomées criblées à ce jour, seulement 35 % sont équipées des voies enzymatiques décrites plus haut, et sont donc capables de produire des aldéhydes toxiques (Ban *et al.*,

## Synthèse

**Observation d'ovocytes**  
(microscopie électronique par transmission)

[A] Atrésie  
[B] Bourgeonnement cellulaire  
[F] Fragmentation du matériel nucléaire

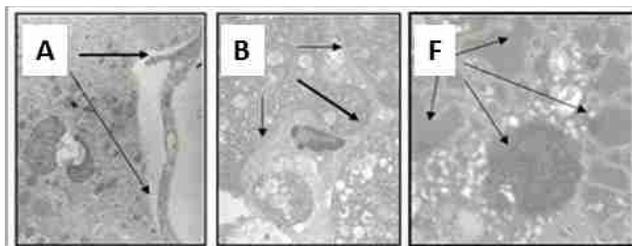


Figure 2- Observation en microscopie électronique par transmission (TEM) des ovocytes de copépodes femelles nourries avec des diatomées toxiques. Exemples de dégradations symptomatiques provoquées par l'accumulation d'aldéhydes toxiques dans les gonades : atrésie, bourgeonnement et fragmentation aux niveaux du cytoplasme, du noyau et de la membrane cellulaire des cellules germinales contaminées (Modifié d'après Poulet *et al.*, 2006).

1999). La majorité des espèces testées ne produit pas d'aldéhydes létaux, ou pas en quantité suffisante pour avoir une toxicité mesurable. La production détectable chez les diatomées productrices d'aldéhydes toxiques, peut varier de 0,2 à > 5 fmol/cellule, selon les espèces (Wichard *et al.*, 2004).

Bien que la production d'aldéhydes impliqués dans la défense chimique soit très spécifique, aucune étude génétique, à notre connaissance, n'a été effectuée pour identifier les gènes participant à cette production chez les diatomées, ou chez d'autres micro-algues planctoniques. Par exemple, la diatomée *Thalassiosira rotula* est la championne en termes de production. A l'inverse, *Prorocentrum minimum*, une autre espèce phytoplanctonique appartenant au groupe des dinoflagellés, n'est

pas productrice d'aldéhydes toxiques (Adolph *et al.*, 2004).

### 3. Les effets tératogènes de la défense chimique

Bien que de nombreux aldéhydes soient connus dans le règne végétal et animal terrestre, pour leurs propriétés odorantes (parmi les fleurs et les fruits) ou répulsives d'insectes, la toxicité des aldéhydes polyinsaturés spécifiques du phytoplancton a été découverte tardivement et par hasard. Les premières mises en évidence ont été obtenues lors d'expériences criblant la valeur nutritive de plusieurs espèces de diatomées sur la production secondaire des copépodes calanoïdes (Poulet *et al.*, 1994).

En laboratoire, des femelles de copépodes nourries avec des cultures de diatomées présentent plusieurs types de réponses, selon les espèces phytoplanctoniques testées. Dans le cas du dinoflagellé *P. minimum*, servant de référence, ou des espèces de diatomées qui ne métabolisent pas ces aldéhydes toxiques, les étapes de la reproduction, particulièrement l'ovogenèse et l'ontogenèse des larves, demeurent normales. Au contraire, les espèces de diatomées productrices d'aldéhydes toxiques provoquent des anomalies de la reproduction légères ou profondes, non-réversibles (Poulet *et al.*, 1994).

L'amplitude des différentes anomalies cellulaires et morphologiques observées en fonction du temps (jour-semaine) est relative à l'espèce algale, à la densité cellulaire dans les régimes alimentaires, au taux de production d'aldéhydes (1-5 fg/cellule) et, enfin, à la toxicité moléculaire, selon une relation dose-réponse. Le déclin de la fécondité des femelles constitue une des premières manifestations provoquée par des diatomées, aboutissant en quelques jours à une stérilité complète, mais réversible à condition de changer de régime non-toxique.

La non-éclosion des œufs pondus constitue la

## Synthèse

seconde anomalie constatée chez les copépodes fortement contaminés. Une troisième manifestation est fournie par les anomalies morphologiques observées dans les ovocytes, les œufs et les larves produits par les femelles contaminées (Figures 2, 3). A l'échelle cellulaire, ces anomalies concernent la structure aberrante du cytosquelette et la dispersion anarchique des chromosomes en fin de mitose, ou l'arrêt de la formation de la membrane cellulaire en fin de division cellulaire, ou encore la présence de nombreuses cellules en phase apoptotique dans les échantillons (Adolph *et al.*, 2004).

Les conséquences sont les suivantes : les d'œufs n'éclosent pas, ou bien les larves meurent rapidement après éclosion. Ces deux phénomènes soulignent l'impact à retardement des diatomées sur les juvéniles. Cet ensemble d'observations illustre l'effet tératogène des diatomées au cours de l'ontogenèse des copépodes (Poulet *et al.*, 1995).

Ce phénomène est paradoxal. En effet, les femelles en capturant et en ingérant des diatomées toxiques, de façon non-sélective, ne sont pas directement intoxiquées. Elles transfèrent les aldéhydes dans les gonades, qui s'accumulent dans les ovocytes (Wolfram *et al.*, 2014, 2015). La gamétogenèse des femelles est profondément perturbée (Poulet *et al.*, 2006). Ainsi la vitellogenèse au cours de la maturation des ovocytes est le théâtre initial de l'activité des aldéhydes stockés dans les réserves lipidiques des copépodes femelles. L'effet létal affecte uniquement les organismes de la génération suivante. Cet effet n'est donc pas immédiat.

D'autre part, en utilisant cette défense chimique, les algues se sacrifient individuellement, probablement à l'avantage de l'ensemble de la population. D'un point de vue énergétique, et surtout évolutif, le bénéfice obtenu par ce type d'inhibition à retardement du prédateur par les diatomées n'est pas évident. Ce qui, à une échelle darwinienne, ouvre une nouvelle fenêtre sur notre conception de l'avantage collectif d'une



Figure 3. Larves de copépodes au stade nauplius. En haut : larves normales, à symétrie bilatérale. En bas : larves anormales, asymétriques. Les anomalies concernent l'inhibition partielle ou totale de l'éclosion des œufs, et la morphogenèse aberrante des larves (Modifié d'après Poulet *et al.*, 1995).

population, gagné au détriment du sacrifice de l'individu.

Chez les copépodes, nous ne connaissons

## Synthèse

pas encore de façon précise les éléments génétiques (ADN, ARN, familles de gènes), ni moléculaires (protéines, enzymes, hormones de croissance) ciblés à l'échelle cellulaire par ces aldéhydes pendant les étapes successives de la maturation ovocytaire et de la morphogenèse embryonnaire ou larvaire (Wolfram *et al.*, 2015 ; Ruocco *et al.*, 2016 ; Lauritano *et al.*, 2016). Nous savons que ces phénomènes d'inhibition sont largement répandus et affectent non seulement les micro-crustacés (copépodes marins et d'eau douce), diverses espèces d'ascidies, de mollusques, d'annélides et d'échinodermes *in vitro* et *in vivo*, mais affectent aussi certains cladocères d'eau douce (*Daphnia pulicaria*), qui n'ont aucune capacité de détoxification (Adolph *et al.*, 2004 ; Caldwell, 2009 ; Van Donk et Lanora, 2011). Cependant cette capacité a été observée au moins chez une espèce de copépode harpacticoïde (*Tisbe holothuriae*) (Taylor *et al.*, 2012).

## Conclusion

Au-delà de la description d'un modèle d'interaction proie-prédateur original, les travaux entrepris sur la chimie des diatomées et la réponse des copépodes aux aldéhydes toxiques ont ouvert un nouveau chapitre de l'écologie marine. Cependant, à l'échelle de la recherche fondamentale, de nombreux points restent à éclaircir aux niveaux génétique et moléculaire pour comprendre précisément comment fonctionne ce processus de défense chimique au niveau cellulaire. Plusieurs équipes réparties dans le monde progressent dans ces domaines.

Observé en laboratoire, et confirmé *in situ* chez les copépodes en Atlantique, en Manche, en Méditerranée, et dans le Pacifique (Ban *et al.*, 1997 ; Miralto *et al.*, 1999 ; Poulet *et al.*, 2007), ce modèle existe-t-il chez d'autres organismes marins, également consommateurs de diatomées ? Alors que toutes les études démontrent la nocivité des aldéhydes, *in vitro*,

sur des échantillons d'hémocytes de mollusques, ou bien d'embryons de copépodes, d'annélides ou d'échinodermes, qui demeurent des modèles expérimentaux en laboratoire, aucunes ne portent sur des observations *in vivo*, utilisant des organismes vivants, telles que le krill, les huîtres ou les moules, qui sont aussi des filtreurs de phytoplancton, à l'instar des copépodes.

L'importance économique de ces mollusques dans l'aquaculture française est bien connue. Celle des diatomées et des copépodes dans le fonctionnement des écosystèmes marins est souvent négligée.

Dans ce contexte, il serait intéressant d'évaluer l'action perturbatrice potentielle de composés naturels toxiques sur la résistance immunitaire des mollusques d'intérêt aquacole, en relation avec l'impact d'agents climatiques et pathogènes, connus pour provoquer, certaines années, des mortalités massives dans les bassins ostréicoles français. De même, il serait utile de se pencher sur les conséquences du changement climatique sur les pêcheries, en portant un regard nouveau, et surtout plus précis, à l'échelon primaire-secondaire du réseau trophique.

En effet, tous les poissons marins dépendent d'une source alimentaire zooplanctonique durant leur vie larvaire. Ils sont zooplanctonophages et la majorité de leurs proies sont des copépodes. Les variations spécifiques du phytoplancton peuvent favoriser l'efflorescence de diatomées toxiques au détriment d'espèces non-toxiques, ou *vice versa*, au détriment de dinoflagellés et de coccolithophores plus sensibles à la diminution de pH, à l'augmentation de la température et aux fluctuations verticale de la thermocline (Hinder *et al.*, 2012).

Si une telle tendance climatique favorisait les diatomées à majorité toxiques, les copépodes seraient décimés les mauvaises années. Un tel changement pourrait modifier le stock disponible de copépodes, proies préférentielles des poissons, et par voie de

## Synthèse

conséquence, il pourrait provoquer des carences suivies de mortalités massives, entraînant une raréfaction des ressources halieutiques exploitables. Ce scénario, théoriquement envisageable en prolongement logique de travaux relatifs aux phénomènes d'allélopathie, reste à démontrer par de futures études.

## Références

- Adolph S, Bach S, Blondel M, Cueff A, Moreau M, Pohnert G, Poulet SA, Wichard T, Zuccaro A. 2004. *Cytotoxicity of diatom-derived oxylipins in organisms belonging to different phyla*, Journal of Experimental Biology, 207, 2935-2946.
- Adolph S, Poulet SA, Pohnert G. 2003. *Synthesis and biological activity of alpha, beta, gamma, delta-unsaturated aldehydes from diatoms*. Tetrahedron, 59, 3003-3008.
- Ban S, Burns C, Castel J, Chaudron Y, Christou E, Escribano R, Fonda Umani S, Gasparini S, Guerrero Ruiz F, Hoffmeyer M, Ianora A, Kang H-K, Laabir M, Lacoste A, Miralto A, Poulet S, Ning X, Rodriguez V, Runge J, Shi J, Starr M, Uye S-I, Wang Y. 1997. *The paradox of diatom-copepod interactions*, Marine Ecology Programme Series, 157, 287-293.
- Bozarth A, Maier U-G, Zauner S. 2009. *Diatoms in biotechnology: modern tools and applications*, Applied Microbiology and Biotechnology, 82, 195-201.
- Caldwell GS. 2009. *The influence of bioactive oxylipins from marine diatoms on invertebrate reproduction and development*. Marine Drugs, 7, 367-400.
- Daboussi F, Leduc S, Marechal A, Dubois G, Guyot V, Perez-Michaut C, Amato A, Falciatore A, Juillerat A, Beurdeley M, Voytas DF, Cavarec L, Duchateau P. 2014. *Genome engineering empowers the diatom Phaeodactylum tricornutum for biotechnology*, Nature Communications, 5, 1-7.
- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski P. 1998. *Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components*, Science, 281, 237-240.
- Hamm CE, Merkel R, Springer O, Jurkojc P, Maier C, Prechtel K, Smetacek V. 2003. *Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection*, Nature, 421, 841-843.
- Hinder SL, Hays GC, Edwards M, Roberts EC, Walne AW, Gravenor MB. 2011. *Changes in marine dinoflagellate and diatom abundance under climate change*, Nature Climate Change, 2, 271-275.
- Islam S, Hasan M, Lei C, Mucha-Pelzer T, Mewis I, Ulrichs C. 2010. *Direct and admixture toxicity of diatomaceous earth and monoterpenoids against the storage pests Callosobruchus maculatus (F.) and Sitophilus oryzae (L.)*, Journal of Pest Science, 83, 105-112.
- Jennings S, Collingridge K. 2015. Predicting consumer biomass, size-structure, production, catch potential, responses to fishing and associated uncertainties in the World's marine ecosystems, PloS One, 10, 2-28.
- Lauritano C, Romano G, Roncalli V, Amoresano A, Fontanarosa C, Bastianini M, Braga F, Carotenuto Y, Ianora A. 2016. *New oxylipins produced at the end of a diatom bloom and their effects on copepod reproductive success and gene expression levels*, Harmful Alga, 55, 221-229.
- Miralto A, Barone G, Romano G, Poulet SA,

## Synthèse

- Ianora A, Russo GL, Buttino I, Mazzarella G, Laabir M, Cabrini M, Giacobbe MG. 1999. *The insidious effect of diatoms on copepod reproduction*, Nature, 402, 173-176.
- Pernet F, Malet N, Pastoureaud A, Malet N, Vaquer A, Quere C, Dubroca L. 2012. *Marine diatoms sustain growth of bivalves in a Mediterranean lagoon*, Journal of Sea Research, 68, 20-30.
- Pohnert G. 2004. *Chemical defense strategies of marine organisms. Chemistry of pheromones and other semiochemicals*, Topics in Current Chemistry, 2309, 179-219.
- Pohnert G, Boland W. 2002. *The oxylipin chemistry of attraction and defense in brown algae and diatoms*, Natural Product Reports, 19, 108-122.
- Pohnert G, Lumineau O, Cueff A, Adolph S, Lange M, Cordevant C, Poulet SA. 2002. *Are volatile aldehydes in diatoms the only line of chemical defence against copepods?*, Marine Ecology Progress Series, 245: 33-45.
- Poulet SA, Ianora A, Miralto A, Meijer L. 1994. *Do diatoms arrest embryonic development in copepods?*, Marine Ecology Progress Series, 111, 79-96.
- Poulet SA, Laabir M, Ianora I, Miralto A. 1995. *Reproductive response of Calanus helgolandicus. I. Abnormal embryonic and naupliar development*, Marine Ecology Progress Series, 129, 85-95.
- Poulet SA, Cueff A, Wichard T, Marchetti J, Dancie C, Pohnert G. 2006. *Influence of diatoms on copepod reproduction. III. Consequences of abnormal oocyte maturation on three reproductive factors in Calanus helgolandicus*, Marine Biology, 152 415-428.
- Poulet SA, Escribano R, Hidalgo P, Cueff A, Wichard T, Aguilera V, Vargas CA, Pohnert G. 2007. *Collapse of Calanus chilensis reproduction in a marine environment with high diatom concentration*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 352, 187-199.
- Rimet F, Bouchez A. 2011. *Use of diatom life-forms and ecological guilds to assess pesticide contamination in rivers: lotic mesocosm approaches*, Ecological Indicators, 11, 489-499.
- Ruocco N, Varrella S, Romano G, Ianora A, Bentley MG, Somma D, Leonardi A, Mellone S, Zuppa A, Costantini M. 2016. *Diatom-derived oxylipins induce cell death in sea urchin embryos activating caspase-8 and caspase 3/7*, Aquatic Toxicology, 176, 128-140.
- Scaife MA, Smith AG. 2016. *Towards developing algal synthetic biology*, Biochemical Society Transactions, 44, 716-722.
- Stevenson RJ, Pan YD, van Dam H. 2010. *Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms*. In The diatoms. Applications for the environmental and earth sciences. (2 nd edition). Smol JP & Stoermer EF (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, 57-85.
- Taylor RL, Caldwell GS, Olive PJW, Bentley MG. 2012. *The harpacticoid copepod Tisbe holothuriae is resistant to the insidious effects of polyunsaturated aldehyde-producing diatoms*, Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 413, 30-37.
- Van Donk E, Ianora A, Vos, M. 2011. *Induced defenses in marine and freshwater phytoplankton: a review*, Hydrobiology, 668, 3-19.

## Synthèse

Wichard T, Poulet SA, Pohnert G. 2004. *Determination and quantification of  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ -unsaturated aldehydes as pentafluorobenzyl oxime derivatives in diatom cultures and phytoplankton: application in marine field studies*, Journal of Chromatography B. Analytical Technologies in Biomedical and Life Sciences, 814, 155-161.

Wolfram S, Nejstgaard JC, Pohnert G. 2014. *Accumulation of polyunsaturated aldehydes in the gonads of the copepod *Acartia tonsa* revealed by tailored fluorescent probes*, PloS One, 9, 1-7

Wolfram S, Wielsch N, Hupfer Y, Monch B, Lu-Walther HW, Heintzmann R, Werz O, Svatos A, Pohnert G., 2015. *A metabolic probe- Enabled strategy reveals uptake and protein targets of polyunsaturated aldehydes in the diatom *Phaeodactylum tricornutum**, PloS One, 10, 1-17.

### Edité par :

Hervé This, directeur de l'Inrae-AgroParisTech International Centre for Molecular and Physical Gastronomy, membre de l'Académie d'agriculture de France.

### Rapporteurs :

1. Chris Bowler est directeur de recherche CNRS à l'Institut de Biologie de l'Ecole Normale Supérieure (IBENS, Paris)
2. Marie-Thérèse Esquerré-Tugayé est professeur émérite, à l'Université Toulouse III-Paul Sabatier, Laboratoire de Recherche en Sciences Végétales ; elle est membre de l'Académie d'agriculture de France.

### Rubrique :

Cet article a été publié dans la rubrique « Synthèse » des *Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France*, 10, 1-11.

### Reçu :

7 juillet 2016

### Accepté :

13 octobre 2016

### Publié :

3 novembre 2016

### Citation:

Poulet S. 2016. *Tératogenèse induite par les diatomées : un modèle d'interaction proie-prédateur transgénérationnelle*. Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France / Academic Notes from the French Academy of Agriculture, 10, 1-11. <https://doi.org/10.58630/pubac.not.a551012>.



Serge Poulet est directeur de recherche émérite du CNRS, spécialisé en biologie marine, écologie planctonique, et membre correspondant de l'Académie d'agriculture de France.

*Notes Académiques de l'Académie d'agriculture de France*  
*Academic Notes from the French Academy of Agriculture*  
*(N3AF)*

## **Synthèse**