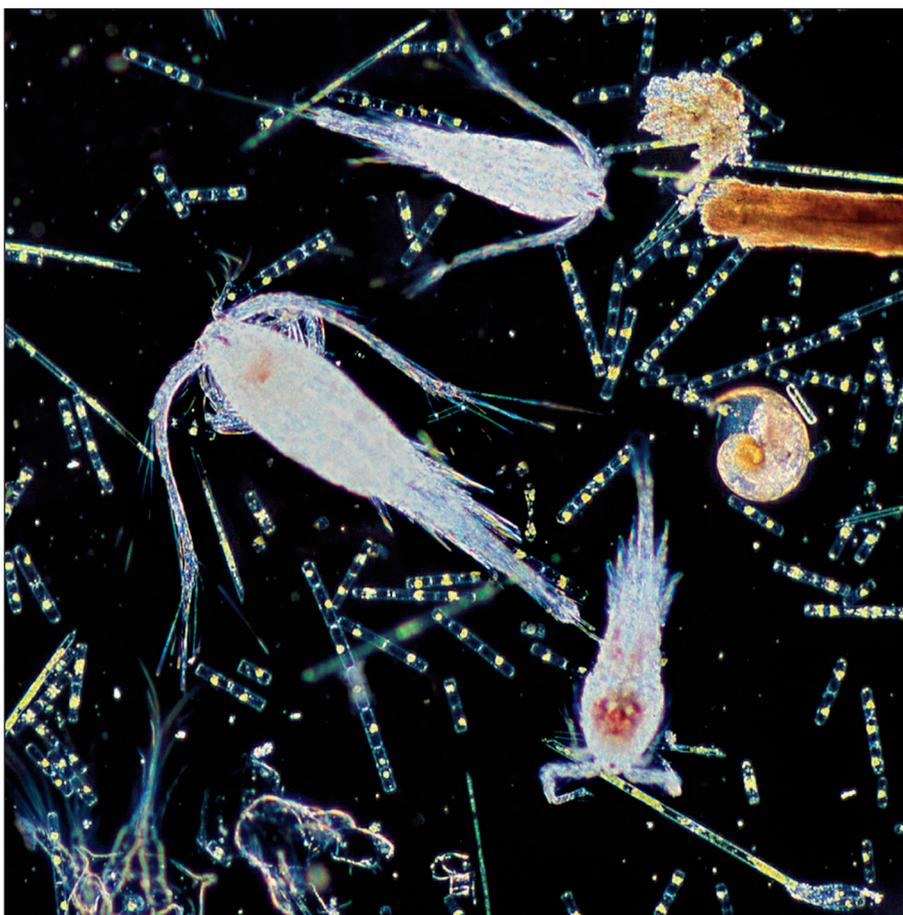


Synthèses

# Plancton marin et pesticides : quels liens ?

Geneviève Arzul, Françoise Quiniou, coord.



éditions  
Quæ



Plancton marin  
et pesticides : quels liens ?



# Plancton marin et pesticides : quels liens ?

Geneviève Arzul, Françoise Quiniou,  
coordinatrices

## *Contributeurs*

Annick Hourmant, Sabine Stachowski-Haberkorn,  
Gaël Durand, Denis de la Broise, Jean Turquet

## *Collection Synthèses*

La symbiose mycorhizienne

Une association entre les plantes et les champignons

Jean Garbaye

2013, 280 p.

Les sols et leurs structures

Observations à différentes échelles

Denis Baize, Odile Duval, Guy Richard, coord.

2013, 264 p.

Structure des aliments et effets nutritionnels

Anthony Fardet, Isabelle Souchon, Didier Dupont, coordinateurs

2013, 470 p.

S'adapter au changement climatique

Agriculture, écosystèmes et territoires

Jean-François Soussana, coord.

2013, 296 p.

Le virus du Nil occidental

Dominique J. Bicout, coord.

2013, 242 p.

Les milieux rupicoles

Les enjeux de la conservation des sols rocheux

Pierre Pech

2013, 168 p.

# Table des matières

---

<b>Chapitre 1. Quelques définitions de base</b> .....	11
Qu'est-ce que le phytoplancton ? .....	11
Qu'est-ce que le zooplancton ? .....	12
Qu'est-ce que le corail ? .....	13
Que sont les pesticides ? .....	15
Qu'est-ce que l'écotoxicologie ? .....	17
Conclusion .....	22
<b>Chapitre 2. Pesticides dans les eaux côtières</b> .....	23
Les pesticides détectés dans les eaux .....	23
Quels sont les pesticides testés dans ces travaux ? .....	28
<b>Chapitre 3. Phytoplancton et pesticides</b> .....	31
Du laboratoire à l'échelle environnementale .....	31
Expérimentations sur les communautés naturelles : des réponses intégrées .....	44
Conclusion .....	59
<b>Chapitre 4. Zooplancton et pesticides</b> .....	61
Les pesticides sont-ils toxiques pour les bivalves ? .....	63
Les différents organismes marins ont-ils des sensibilités identiques ? ....	74
Conclusion .....	77
<b>Chapitre 5. Coraux et pesticides</b> .....	79
Le bioessai corail .....	79
Sensibilité des coraux aux pesticides .....	80
Conclusion .....	81
<b>Conclusion générale</b> .....	83
La grande importance du très petit : le plancton marin .....	83
Les eaux côtières, zone de rencontres, zone de diffusion .....	83
L'impact des pesticides sur le plancton marin : suspensions puis évidences .....	84
Conséquences de la contamination par les pesticides, aujourd'hui et demain .....	85
<b>Annexes</b> .....	87
Annexe 1. Caractéristiques des différents types de microcosmes et mésocosmes .....	87
Annexe 2. Méthodes d'analyses des pesticides .....	89

Annexe 3. Principe et déroulement du bioessai sur la croissance des cultures phytoplanctoniques en milieu tempéré ....	90
Annexe 4. Protocole du bioessai « phytoplancton tropical » .....	91
Annexe 5. Test d'inhibition de croissance du phytoplancton pour l'évaluation de la qualité d'échantillons d'eau de mer naturelle ....	93
Annexe 6. Caractéristiques des quatre masses d'eaux testées .....	94
Annexe 7. Les microcosmes <i>in situ</i> .....	95
Annexe 8. Protocole du bioessai sur le développement embryon-larvaire de l'huître creuse <i>Crassostrea gigas</i> .....	95
Annexe 9. Concentrations mesurées, des huit substances actives testées seules et en mélange .....	96
Annexe 10. Formulations testées en mélange, et concentrations des substances actives correspondantes dans la solution mère du mélange .....	97
Annexe 11. Cycle de reproduction chez l'huître creuse <i>Crassostrea gigas</i> .....	97
Annexe 12. Références des méthodes spectro-photométriques .....	97
Annexe 13. Pesticides détectés dans les échantillons d'eaux du bassin de Marennes-Oléron (juin 2005) .....	98
Annexe 14. Protocole expérimental du test bactérie bioluminescente <i>Vibrio fischeri</i> .....	98
Annexe 15. Références des protocoles appliqués pour comparer la pollu-sensibilité des espèces tempérées et tropicales....	99
Annexe 16. Protocole mis au point pour les bioessais sur le corail .....	101
<b>Glossaire</b> .....	103
<b>Références bibliographiques</b> .....	111
<b>Liste des auteurs</b> .....	123

# Préface

---

L'utilisation des pesticides pour réguler les ravageurs des cultures, augmenter les rendements ou faciliter le travail agricole, a eu le vent en poupe pendant tout le vingtième siècle. Des alertes ont bien vu le jour, notamment du fait des dangers inhérents à ces molécules, conçues pour tuer. Pendant longtemps, le Credo technologique et l'absence de transparence sur les caractéristiques toxicologiques des substances actives, leurs usages, leur devenir ont permis à un calme relatif, mais précaire, de régner, notamment au sein des médias. L'auteur de ces lignes se souvient des nombreux arguments utilisés aussi bien par les industriels que les pouvoirs publics pour justifier l'absence de transparence : incompréhension du public et donc inquiétude injustifiée, protection des secrets industriels, absence de certitude sur les impacts, etc.

Aujourd'hui, nous sommes arrivés à une situation de crise. L'évidence d'une contamination généralisée des eaux est devenue claire pour tout le monde. Le coût de la pollution des eaux par l'agriculture est estimé à près d'un milliard d'euros qui pèsent sur les ménages, encore ne s'agit-il que d'une estimation minimale car ignorant les coûts cachés. Les études épidémiologiques commencent à montrer des effets possibles sur la santé des agriculteurs. Les résistances aux pesticides s'étendent, provoquant une stagnation de l'accroissement des rendements. Il en résulte une perte de confiance des consommateurs dans l'alimentation, au moment même où les pouvoirs publics voudraient inciter à la consommation de fruits et légumes. Les agriculteurs souffrent de se sentir attaqués et fustigés, ou piégés par un système qui les a rendu dépendants d'un modèle qui aujourd'hui échoue. La demande augmente considérablement pour les produits de l'agriculture biologique que la France est obligée d'importer, ce qui crée également une inégalité sociale dans l'accès à l'alimentation de qualité. La réforme de la Politique agricole commune (PAC) paraît encore bien timide eu égard aux enjeux.

Il ne faut cependant pas perdre espoir. La prise de conscience est maintenant bien partagée. Le ministère de l'Agriculture promeut l'agroécologie. Les recherches de méthodes alternatives à l'usage des pesticides se développent, notamment dans le cadre du programme Pesticides du ministère chargé de l'Écologie, lui-même maintenant financé dans le cadre du programme Écophyto. De nombreuses associations paysannes ou de consommateurs organisent des circuits de distribution de produits biologiques.

La recherche et l'enseignement sont des éléments clés du changement attendu vers une agriculture se passant des intrants chimiques. Il faut développer de nouvelles

connaissances, sur les impacts, sur les risques, sur les méthodes agronomiques alternatives et sur la gestion du changement. Il faut former les nouvelles générations, mais aussi les agriculteurs en place et leurs conseillers aux nouvelles pratiques.

Tout l'intérêt de l'ouvrage que vous avez entre les mains est de montrer avec précision comment des pratiques agricoles sur les territoires impactent significativement, parfois à grande distance, le fragile fonctionnement des écosystèmes littoraux. Le rôle du plancton est fondamental pour de nombreux mécanismes écologiques comme les symbioses. C'est le siège de la production primaire et secondaire, moins spectaculaire pour les non-spécialistes mais très importante pour l'ensemble de la chaîne trophique, donc pour les ressources halieutiques. La boucle est bouclée, sans négliger l'impact des prélèvements directs sur ces ressources, on voit bien que la performance d'un service écosystémique dépend de l'exploitation d'un autre. Que la gestion d'un territoire continental ne peut être dissociée de celle de la mer.

C'est donc à la gestion de la complexité que cet ouvrage convie, à l'intégration de l'ensemble des composantes de la nature et à une réflexion sur la place de l'homme dans cet environnement. Une contribution importante à l'avènement d'une humanité furtive, dont l'empreinte écologique un jour deviendra si faible qu'on en perdra la trace. L'enjeu qui nous concerne tous, c'est de brouiller nos traces, sans disparaître !

Éric Vindimian

Conseil général de l'Environnement et du Développement durable  
au ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

# Remerciements

---

Cet ouvrage résulte de la mise en commun des résultats de travaux effectués pour rechercher les effets des pesticides sur le plancton, dans le cadre de plusieurs projets de recherche répondant à des appels d'offres régionaux et nationaux financés par les conseils généraux, les régions et le ministère de l'Écologie. Nous leur exprimons notre reconnaissance pour leur soutien financier.

La synthèse présentée provient de longues collaborations entre des équipes de scientifiques, de différents instituts, universités et organismes de recherche français, qui se sont penchés sur l'étude des effets potentiels des pesticides sur les organismes planctoniques marins, non ciblés. Nous remercions nos organismes de tutelle pour leur soutien logistique, qui a contribué au bon déroulement de ces collaborations.

Nous avons grand plaisir à remercier Éric Vindimian, directeur du Conseil général de l'Environnement et du Développement durable au ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, d'avoir accepté de préfacier notre ouvrage

En tant que coordinatrices, nous remercions vivement tous ceux qui ont participé aux prélèvements, cultures et élevages, analyses et bioessais : Daniel Masson, Christiane Videau, Michèle Roméo, Édouard His, Édith Delesmont, Régis Delesmont, Harold Cambert, Marie-Pierre Crassous, Agnès Youéno, Marie-Madeleine Daniélou, Xavier Caisey, Romain Davy, Pascale Malestroït, Gwendolina Limon, Dorothee Hureau, Jacques Dussauze, Marylène Jourdin, Anthony Cailleau, Sylviane Thomas, Harold Anseaume, Aurélie Vion, Fabien Tona. Nous avons tout particulièrement apprécié le travail sérieux des étudiants stagiaires qui ont participé à ces recherches : Nathalie Wessel, Audrey Robic, Patrick Pouline, Matthieu Lassus, Charlotte Laisné, Gautier Damiens, Steffie Sauren, Erwan Quéré, Benoît Jan, Véronique Dupin, Émilie Brunet, Émilie Colmagro, Claire Sintes, Caroline Leturque, Caroline Devoyer, Cécile Carrié, Madeleine Breugnot, Julien Quéré, Guillaume Forget, Fabien Barloy, Benoît Klein, Colin Le Balle, Jonathan Pothier, Maude Moison, Gwendal Cueff, Charles-Édouard Thuroczy, Anis Amara, Frédéric Soulier, Audrey Pichavant, Céline Rety, Matthieu Lajeunesse, Morgane Hubert, Fanette Barraquet, Johann Legrand, Gabriel Dieuset, Camille Kerros, Yann Le Floch, Éléonore Che.

Malgré l'éloignement de notre secteur de recherche avec celui d'Annette Bérard (Inra-Thonon), nous la remercions chaleureusement de nous avoir fait profiter de ses expériences, antérieures aux nôtres dans le domaine présenté ici.

Un grand merci à Nelly Courtay pour sa grande patience et ses conseils judicieux, ainsi qu'à Pierre Mollo pour ses encouragements, Maurice Loir pour l'illustration gracieusement offerte, et Louis Quiniou pour son aide précieuse à l'iconographie.



# Introduction

---

L'emploi des pesticides en milieux terrestres s'est largement et longuement répandu pour des raisons économiques et sanitaires. Cependant l'impact de ces molécules ne s'est pas limité aux cibles initialement prévues. Les résidus, transportés par les lessivages des surfaces agricoles et les écoulements des eaux usées, se retrouvent à plus ou moins long terme jusqu'en eaux côtières et estuariennes, en contact avec des organismes non ciblés. À ce niveau des écosystèmes, les pesticides exercent encore des effets perceptibles comme l'ont montré les expériences sur le plancton\*, végétal et animal.

D'une façon générale, les pesticides diminuent ou modifient la production chlorophyllienne, la respiration, la croissance et la multiplication cellulaire. En altérant l'activité métabolique, les pesticides influent sur la composition chimique et la génétique des cellules. Les expériences sur cultures mono-spécifiques de phytoplancton\* et assemblages naturels pluri-spécifiques, ainsi que sur des développements embryolairaires et post-lairaires de bivalves, ont montré que les pesticides en formulation présentent une toxicité plus élevée que les molécules actives pures. De plus, l'association de pesticides peut s'avérer particulièrement toxique. Il n'est cependant pas possible de généraliser la relation dose-effet sur les populations planctoniques naturelles. En effet, les facteurs qui influencent la réponse du plancton sont nombreux : mode d'action du pesticide, réponse espèce-dépendante, conditions environnementales, relations inter-espèces, stade de développement, pré-exposition des cellules-mères ou des géniteurs induisant une résistance transmissible aux descendants. En outre, les pesticides peuvent altérer la biodiversité en permettant le développement, d'une part, d'espèces parfois de moindre intérêt dans la chaîne alimentaire et, d'autre part, d'espèces indésirables pour le bon fonctionnement des écosystèmes et la santé humaine. Les organismes planctoniques sont donc des bio-indicateurs\* intéressants tant au laboratoire comme organismes tests, que dans les études de suivi de qualité du milieu naturel.

L'emploi des composés chimiques de synthèse en agriculture, bien que connu depuis longtemps, n'a vu son développement se généraliser qu'au xx<sup>e</sup> siècle. Le bénéfice qui résulte de leur application est incontestable sur le plan des rendements agricoles et de la qualité sanitaire des récoltes, mais de nombreux effets indésirables apparaissent et en ternissent les retombées positives. Parmi les conséquences non

---

\* Termes définis dans le glossaire placé en fin d'ouvrage (p. 87-102).

contrôlées de l'emploi des pesticides\*, il faut relever la persistance des résidus\* qui se retrouvent dans les organismes cibles et non-cibles, ainsi que dans les circuits des aquifères et jusqu'en eaux côtières. Les caractéristiques des molécules conditionnent ces comportements dans le milieu, et les propriétés toxiques des substances actives se retrouvent parfois dans les résidus, produisant encore des effets chez les organismes non ciblés.

L'objectif de cet ouvrage est de montrer que les pesticides employés en zones terrestres peuvent atteindre et perturber les organismes vivant en zones côtières. Dans ce but, des expérimentations ont été réalisées en laboratoire mais aussi dans le milieu naturel sur des organismes essentiels pour l'écosystème : les organismes planctoniques.

L'importance écologique du plancton végétal, ou phytoplancton, est due à sa position dans la chaîne trophique dont il constitue le premier maillon. Le plancton animal, ou zooplancton, représente le deuxième maillon de la chaîne trophique et correspond, dans de nombreux cas, aux stades de développement embryon-larvaire et post-larvaire d'organismes benthiques d'intérêt économique : crustacés, mollusques, poissons, etc.

La mise en évidence des effets des pesticides dans les eaux côtières est présentée à travers des expériences *in vitro* sur le plancton. Les résultats comparés aux observations dans le milieu naturel permettent de montrer et de mieux comprendre les mécanismes responsables des dystrophies\* observées parfois.

Parmi les différents exemples de symbiose\* connus, les coraux (Scléactiniaires\*) représentent une organisation de vie basée sur une association végétal/animal : zooxanthelle/polype corallien. La symbiose prend effet dès que les larves ciliées (*planula*), après une vie planctonique de quelques jours, tombent sur le fond puis se fixent sur un substrat dur pour donner, après métamorphose, le premier polype de la colonie corallienne. C'est pourquoi la présence de pesticides agissant sur l'un ou l'autre des symbiontes est susceptible d'impacter le fonctionnement de l'écosystème corallien, ce qu'ont montré les résultats en laboratoire.

Ainsi, les traitements les plus anodins et habituels appliqués en régions rurales et urbaines, même éloignées des côtes et, à plus forte raison ceux des zones proches du littoral et des estuaires, peuvent avoir un impact jusqu'aux plus petits organismes marins, dont le rôle est primordial dans les écosystèmes côtiers.

## Chapitre 1

---

# Quelques définitions de base

Ce chapitre présente les acteurs de l'ouvrage : le plancton et les pesticides. Le plancton est constitué par le phytoplancton et le zooplancton, organismes vivant dans la colonne d'eau des milieux aquatiques. Les pesticides sont des molécules appartenant à des familles chimiques variées, à l'origine appliquées en milieu terrestres, et parfois retrouvées à l'état de traces dans les milieux aquatiques. L'écotoxicologie\*, discipline scientifique qui permet de prédire, détecter et quantifier les effets des contaminants sur le milieu et les organismes qui y vivent, est également présentée.

### » Qu'est-ce que le phytoplancton ?

Le phytoplancton, ou plancton végétal, désigne l'ensemble des organismes unicellulaires, principalement autotrophes\*, vivant en suspension dans l'eau et soumis au mouvement des masses d'eau. Il est constitué de cellules de diverses morphologies et de petites tailles (de moins d'1  $\mu\text{m}$  à plus de 100  $\mu\text{m}$ ), d'où leur appellation parfois de micro-algues. Les cellules phytoplanctoniques peuvent vivre seules, dispersées, en colonies, ou en étroite association (*planche 1.1*). Le phytoplancton comprend en majorité des eucaryotes\*, mais également des procaryotes\* comme les cyanobactéries\* (anciennement appelées algues bleues). Leurs besoins nutritifs varient selon les espèces, lesquelles se retrouvent dans les milieux dont les caractéristiques physico-chimiques correspondent au *preferendum* de chacune. Cette correspondance serait le résultat d'une longue adaptation des espèces à l'environnement, qu'il soit marin ou dulçaquicole\*, tempéré ou extrême, riche ou oligotrophe\*.

Dans le milieu aquatique, le phytoplancton joue un rôle essentiel en tant que producteur primaire : grâce à l'énergie lumineuse, il assimile le dioxyde de carbone atmosphérique pour fabriquer de la matière organique. Cette propriété autotrophe du phytoplancton due à la synthèse chlorophyllienne le situe à la base des réseaux trophiques océaniques. Il constitue la base de l'alimentation pour les populations aquatiques hétérotrophes : les consommateurs primaires que sont les herbivores (comme certains copépodes planctoniques ainsi que les filtreurs tels que les bivalves...), et les consommateurs secondaires composés des carnivores. Le phytoplancton est donc la clé de voûte de l'écosystème aquatique, dans un milieu où le décalage temporel, la diminution ou la disparition d'un élément, peuvent affaiblir l'ensemble des consommateurs primaires et secondaires.

La composition biochimique complexe du phytoplancton renforce son intérêt nutritionnel pour les consommateurs primaires. En effet, glucides, protéines et lipides forment des composés aux propriétés spécifiques répondant aux besoins particuliers des organismes qui s'en nourrissent. La spécificité des besoins nutritionnels est illustrée par le cas des stades embryo-larvaires et post-larvaires chez les mollusques, dont le bon développement est conditionné par la disponibilité d'un fourrage adapté en taille et en constituants.

Le phytoplancton d'ordre végétal fonctionne donc de façon similaire aux végétaux terrestres, avec des besoins en substances nutritives, en lumière et en dioxyde de carbone. Ainsi, plusieurs facteurs environnementaux peuvent mettre en cause l'équilibre naturel entre espèces, dans les communautés phytoplanctoniques : les pesticides, les excédents nutritifs conduisant à l'eutrophisation\*, les perturbations de l'hydrodynamisme et le climat. Tous ces facteurs contribuent à plus ou moins long terme, à un déséquilibre temporaire ou définitif, d'où l'intérêt de sa mise en évidence pour en prendre les contre-mesures à partir des facteurs contrôlables, comme la présence des pesticides.

## ►► Qu'est-ce que le zooplancton ?

Le zooplancton\* correspond aux organismes planctoniques non photosynthétiques et/ou de nature animale. C'est l'ensemble des organismes hétérotrophes, c'est-à-dire qui prélèvent la matière organique sur d'autres particules ou organismes du milieu extérieur, que ceux-ci soient vivants ou non.

Le zooplancton est constitué :

- du proto-zooplancton (Protozoaires\*) tels que les Protistes\* dont les flagellés sans pigments photosynthétiques (ex. les noctiluques), les Rhizopodes (Foraminifères, Acanthaires, Radiolaires), les ciliés (ex. les Tintinides) ;
- du méta-zooplancton (Métazoaires\*) dont les Cnidaires\*, les Cténares\*, les Vers, les Crustacés, les Mollusques, les Tuniciers\* et des organismes benthiques ayant une phase de développement pélagique.

Ces organismes appartenant à des embranchements très variés ont des tailles qui se situent entre une dizaine de micromètres à plusieurs centimètres, voire supérieures à un mètre pour les colonies de salpes et siphonophores que sont les Cnidaires. Les densités des peuplements planctoniques présentent des variations saisonnières, verticales et nyctémérales\* (Bougis, 1974b). Le zooplancton peut migrer soit vers le fond, soit vers la surface, en fonction de la lumière, de paramètres physico-chimiques (température, alimentation disponible...) et biologiques (espèce et stade physiologique...).

Selon le cycle de vie des organismes, le plancton est classé en holoplancton et méroplancton :

- l'holoplancton regroupe les organismes dont toute la vie se déroule dans la communauté pélagique, ce sont essentiellement des copépodes représentant jusqu'à 80 % du zooplancton. On y trouve également des Ostracodes, des Cnidaires, des Chaetognathes, ou des Tuniciers (ex. Appendiculaires) ;

– les organismes du méroplancton rassemblent ceux qui n’y passent qu’une phase de leur développement, le plus fréquemment les phases embryonnaire et larvaire [ex. Rotifères, Anthozoaires\* (classe des Cnidaires), Crustacés, Annélides, Bivalves, Échinodermes, Tuniciers, Prochordés\*, Poissons osseux...], ou la phase adulte dans le cas du sous-embranchement des Cnidaires que sont les Médusoaires\* dont les méduses (phase sexuée reproductrice) sont planctoniques (Bougis, 1974a, b).

Les organismes du zooplancton pouvant être phytophages, carnivores, omnivores, détritivores ou suspensivores, leur exposition aux contaminants peut être directe ou indirecte. Ces organismes sont alors soit exposés directement aux xénobiotiques\* présents dans la colonne d’eau, soit *via* leur alimentation si leurs proies sont elles-mêmes contaminées (contamination alimentaire incluant la modification de la qualité nutritive des proies elles-mêmes exposées à des contaminants). Ces deux modes d’exposition sont la conséquence de l’ensemble des interactions existant au sein d’un écosystème telles que décrites par Frontier et Pichod-Viale (1993).

Le zooplancton est l’un des maillons clés des réseaux trophiques marins. Il est la source alimentaire pour les animaux d’organisation supérieure carnivores. Ce plancton sert de nourriture aussi bien pour les copépodes omnivores et/ou carnivores, que pour les petits polypes des coraux, les poissons, les organismes benthiques ou encore l’énorme requin baleine ou la baleine elle-même. (Bougis, 1974a, b). L’exposition des organismes du zooplancton aux contaminants, qu’elle soit directe ou indirecte, participe à leur bioamplification dans la chaîne trophique, et ce, jusqu’à l’homme.

De même que le plancton végétal peut être affecté par la présence de pesticides autres que les herbicides, le plancton animal peut, lui aussi, être impacté par tous types de molécules arrivant en milieu marin. Il est donc essentiel de vérifier si ces organismes, non initialement ciblés, sont ou non, exposés et atteints dans leur intégrité.

## » Qu’est-ce que le corail ?

Les coraux sont des animaux qui appartiennent à l’embranchement des Cnidaires. Ce sont des espèces animales exclusivement aquatiques englobant les hydres, les anémones de mer, les coraux, les méduses. Les Cnidaires regroupent des espèces très diversifiées à la fois par leur nombre (près de 10 000 espèces reconnues) mais également par leurs formes. Ils partagent cependant tous les caractéristiques suivantes : un corps formé d’un sac à paroi double, muni d’un seul orifice et entouré d’une couronne de tentacules comportant des cellules urticantes, ainsi qu’un cycle de reproduction particulier. En milieu tropical, les coraux sont parmi les espèces emblématiques et majoritaires. Très diversifiés, ils peuvent être : durs à squelette calcaire (les Scléactiniaires et les Hydrozoaires), souples, à squelette corné (Gorgones, corail noir) ou mous, sans véritable squelette (Alcyonaires).

Les récifs coralliens sont majoritairement constitués par des coraux durs à squelette calcaire (ou Hexacoralliaires\*) appartenant à l’ordre des Scléactiniaires. Ils couvrent environ 284 000 km<sup>2</sup>, correspondant à 15 % de la surface des fonds de 0 à 30 mètres

de l'océan mondial. Ils se répartissent entre les latitudes 30° Nord et 30° Sud, et leur extension est principalement limitée par la température, la salinité et la charge sédimentaire de l'eau de mer. Les côtes de plus d'une centaine de pays, essentiellement en développement, présentent des structures récifales dont l'importance est loin d'être négligeable sur le plan des économies locales et de la protection des lignes de rivages. Les coraux constituent ainsi l'infrastructure de base dans ces écosystèmes et permettent le développement d'une flore et d'une faune particulièrement riches.

La plupart des Cnidaires sont carnivores, très actifs dans la capture de proies constituées majoritairement d'organismes planctoniques, de petits invertébrés, voire parfois de petits poissons. Les coraux vivent dans des eaux claires, donc pauvres en plancton, et seulement 10 à 20 % de leurs besoins sont couverts par hétérotrophie\*. De nombreuses espèces de Cnidaires entretiennent une symbiose avec des algues microscopiques, les zooxanthelles. Il s'agit d'une endo-symbiose où la zooxanthelle (appartenant au genre *Symbiodinium*) va bénéficier de la protection et du CO<sub>2</sub> de l'animal. En retour, elle va fournir les glucides qu'elle aura synthétisés par photosynthèse, qui serviront de nutriments pour l'animal. Les zooxanthelles apportent une grande quantité d'énergie aux Cnidaires et participent ainsi à l'édification du squelette calcaire.

Ces bénéfiques réciproques sont à la base du développement des colonies coralliennes et reposent sur le bon fonctionnement des deux constituants, le végétal et l'animal. La rupture de la symbiose entre la zooxanthelle et le cnidaire, peut avoir des conséquences fatales pour l'animal.

Il est devenu de plus en plus évident que les récifs coralliens représentent, de loin, le type d'écosystème le plus menacé de la planète. Ils sont exposés à tous les types de dégradations d'origine anthropique, en particulier au spectre complet des polluants (Salvat, 2005). L'importance de la pollution des eaux récifales par les substances chimiques et ses conséquences écotoxicologiques n'a, jusqu'à présent, donné lieu qu'à un nombre assez restreint de publications, bien que la dégradation des écosystèmes coralliens soit régulièrement évoquée. De plus, de façon paradoxale, très peu d'études concernent l'impact des produits chimiques utilisés en agriculture sur les coraux (Ramade et Roche, 2006).

Le blanchissement des coraux est le résultat de l'expulsion de leurs zooxanthelles symbiotiques de couleur brune, laissant apparaître leur squelette calcaire blanc, au travers de la transparence des tissus. Le blanchissement est un état transitoire, qui conduit souvent à la mort du corail, au-delà duquel des récupérations sont aussi observées. Les coraux ont des capacités d'adaptation, mais celles-ci sont affaiblies par les dégradations chroniques auxquelles les coraux doivent faire face.

Plusieurs facteurs environnementaux peuvent induire le blanchissement des coraux. L'élévation de la température de l'eau de mer est le principal facteur impliqué, agissant en synergie avec les radiations solaires. Une baisse de salinité peut aussi provoquer un blanchissement (Faure, 1987 ; Coles et Brown, 2003). En 1998, durant le pire épisode de blanchissement corallien enregistré, jusqu'à 90 % des coraux ont été détruits dans certaines régions de l'océan Indien (Quod et Bigot, 2000 ; Conand *et al.*, 2002). Par ailleurs, le rôle des pesticides dans la dégradation des récifs coralliens reste encore peu documenté bien que suspecté (Devlin *et al.*, 2012 ; Kennedy *et al.*, 2012).

## » Que sont les pesticides ?

Les pesticides, encore appelés produits phytosanitaires ou phytopharmaceutiques, sont des substances d'origine naturelle ou manufacturée, ayant la propriété de repousser, réprimer ou réguler le développement des organismes vivants considérés comme nuisibles. Depuis l'avènement de la chimie industrielle, l'usage des pesticides organiques de synthèse s'est répandu, essentiellement en agriculture. Selon leurs cibles, ces molécules sont appelées insecticides et acaricides (elles détruisent insectes et acariens ravageurs), herbicides (elles éliminent les adventices), fongicides (elles suppriment les champignons et moisissures), et rodenticides (elles exterminent les rongeurs). Ces derniers ne sont pas pris en considération dans l'ouvrage.

Les tonnages synthétisés dans le monde au début du XXI<sup>e</sup> siècle s'élèvent à 40 475 millions de dollars, tandis qu'en France le tonnage de substances actives vendues est de 48 800 tonnes en 2011 pour les produits de synthèse (chiffres UIPP\*).

Les molécules actives sont utilisées en formulations, mélanges de molécules de natures chimiques différentes ayant des propriétés émulsifiantes\*, mouillantes, colorantes ; l'ensemble étant dilué dans une matrice solide (poudre) ou liquide (eau, solvant). Leur emploi s'est étendu de façon intensive au cours du XX<sup>e</sup> siècle, encadré par une réglementation concernant la mise sur le marché des produits phytopharmaceutiques (Directive 91/414/CEE, Règlement 1107/2009 EC) tenant compte des caractères suivants :

- efficacité et spécificité, atténuées par le développement de tolérance chez certains organismes ;
- stabilité des molécules-mères et propriétés des résidus, entraînant la bioaccumulation et des effets indésirables chez les organismes non-cibles ;
- et différentes autres caractéristiques de leurs effets (santé, environnement, eau/sols et organismes).

Des étapes de révision sont prévues, environ tous les 10 ans, pour l'homologation des produits phytosanitaires. Cela conduit progressivement au retrait de la vente en France, de certaines matières actives (ex. l'atrazine). Entre 1996 et 2012, 648 matières actives ont été radiées de la liste de l'Annexe I de la Directive 91/414/CEE (Acta, 2012).

## Les insecticides

Les insecticides, dont les propriétés visent à détruire certains insectes, sont les premières molécules de pesticides connues et utilisées. Ces molécules agissent principalement sur le système nerveux, (néonicotinoïdes, carbamates, organophosphorés, pyréthriinoïdes...), mais aussi sur la respiration (pyrazoles...) ou la synthèse de chitine (benzoylurées...) et des régulateurs de croissance (dérivés des pyridines...). Actuellement en France, les organochlorés (ex. DDT) sont interdits en raison de leur propriété cancérigène. Ces molécules ont montré une grande persistance et bio-accumulation dans l'environnement et les tissus.

## Les herbicides

Les herbicides utilisés pour empêcher le développement des végétaux sont produits en grandes quantités ; ils représentent 70 à 80 % des produits utilisés en raison de leur application sur de larges étendues. Les herbicides agissent sur les cellules à différents niveaux métaboliques :

- perturbation de la croissance (auxines de synthèse, dinitroanilines) ;
- inhibition de la synthèse des acides aminés i) branchés (sulfonylurées, imidazolines), ii) aromatiques (glyphosate), iii) de la glutamine (glufosinate) ... ; inhibition de la synthèse des lipides : des acides gras (cyclohexanediones, aryloxyphénoxypropanoates) ou de leur élongation (chloroacétamides) ;
- perturbation de la photosynthèse au niveau de la synthèse des caroténoïdes (amino-triazole, sulcotrione), de la chlorophylle (diphényléthers), du transport des électrons au niveau de PS 2 (triazines, dérivés de l'urée et de l'uracile), du PS 1 (bipyridiles).

D'autres types de molécules aux sites d'action variés se rencontrent également comme les amides (isoxaben), thiocarbamates (molinate), les dinitrophénols (dinosèbe). Leur usage s'est développé surtout après 1950. Les molécules herbicides actuellement rencontrées sont nombreuses.

## Les fongicides

Les fongicides de synthèse ont été produits surtout depuis 1970, en complément du cuivre et du soufre, augmentant leur efficacité. Ils sont largement utilisés pour les traitements de céréales et des plantes à graines (colza).

Ils agissent en inhibiteurs :

- de la respiration (dithiocarbamates, chloronitriles, amines, amides...) ;
- du métabolisme des glucides et des polyols (organophosphorés, imides...) ;
- de la biosynthèse des lipides (carbamates, triazoles, amides...), des acides aminés (hétérocycles azotés), des acides nucléiques (amides, amines...) ;
- de la division cellulaire (carbamates, phénylurées...).

Certaines substances actives agissent simultanément sur des cibles différentes. Il en est ainsi du foséthyl-aluminium ayant à la fois des propriétés fongicide et bactéricide.

## Les biocides

Certaines substances actives de pesticides, peuvent aussi se retrouver dans des produits classés biocides\*. Ils sont régis par la Directive 98/8/EC, qui les définit ainsi : « Les substances actives et les préparations contenant une ou plusieurs substances actives qui sont présentées sous la forme dans laquelle elles sont livrées à l'utilisateur, qui sont destinées à détruire, repousser ou rendre inoffensifs les organismes nuisibles, à en prévenir l'action ou à les combattre de toute autre manière, par une action chimique ou biologique. » Les produits biocides contenant des pesticides impactant directement le milieu marin sont principalement les peintures anti-salissures\* (ou *antifouling*) dans lesquelles le tributyl-étain était remplacé par des inhibiteurs de la photosynthèse : le diuron (phénylurée) et l'irgarol ou cybutryne