

Chapitre 1

Introduction

1.1 La recherche de lois

La science vise à décrire et comprendre le monde qui nous entoure. Elle utilise pour cela des méthodes, une approche du monde réel. A la base de l'approche scientifique se trouve la volonté de généralisation. L'être humain a constaté la régularité de certains phénomènes et a proposé des lois pour expliquer leur régularité : il a cherché à généraliser, à expliquer la régularité constatée de façon empirique.

Pourtant, il y a quelquefois des études descriptives. Les chercheurs en question expliquent dans leurs articles : nous avons utilisé tel instrument ; nous l'avons installé dans tel endroit, tel jour ; nous avons enregistré tel phénomène. Quelquefois ils ajoutent « C'est étrange, ce phénomène que nous avons observé semble inexplicable ». Quelquefois ils précisent « ce phénomène n'est en accord avec aucune théorie existante », mais l'explication théorique générale est laissée à d'autres chercheurs. Ces études sont appelées descriptives par le fait qu'elles décrivent une situation sans véritable tentative de modélisation ou de théorisation. Mais, si elles se contentaient de décrire un endroit donné à un moment donné, ces études seraient d'une portée très limitée. En fait, derrière toute étude descriptive se trouve l'idée souvent informulée, d'une certaine régularité. Ce qui semble ponctuel est observé, décrit, avec l'hypothèse sous-jacente qu'il n'est pas si ponctuel. Ce qu'on a observé une fois pourrait se reproduire ailleurs et à un autre moment. Même au sein des études qui peuvent sembler les plus descriptives et sans portée générale, se trouve une ambition cachée de généralité.

Cependant, les études scientifiques qui possèdent le cadre d'application le plus étendu sont considérées comme les plus importantes. Par exemple, en étudiant les champignons, les scientifiques ne cherchent pas à comprendre le fonctionnement d'un champignon particulier qui aurait poussé à un endroit par hasard. Ils cherchent *a priori* à caractériser une espèce, et peut-être même un ensemble d'espèces.

Plus la loi mise en évidence est générale, plus elle est importante. Les lois les plus générales sont appelées universelles. La quête de l'universel a historiquement été surtout sensible dans le domaine des sciences physiques : les chercheurs ne veulent pas décrire une pomme qui tombe un jour donné sur la planète Terre ; ils veulent comprendre les pommes qui tombent à n'importe quel moment ; ils veulent comprendre toutes les chutes de pommes ; ils veulent comprendre toutes les chutes d'objets ; finalement ils veulent comprendre toutes les attractions entre deux objets, non seulement sur la planète Terre, mais partout dans l'Univers. Cet exemple, avec la loi universelle de l'attraction, imaginée par Newton à partir de l'observation de la chute d'une pomme (selon la légende), illustre parfaitement la quête de l'universalité des physiciens, et des chercheurs scientifiques en général. Le chercheur descriptif qui rend compte de ce qu'il a vu au fond de son jardin le 3 décembre 2010 après-midi n'a pas pour autant une activité inutile. Il a mis en évidence un certain comportement, une certaine régularité, peut-être une « loi », et l'objectif qui est caché derrière son observation au caractère descriptif, est de trouver une régularité, un élément généralisable, un point commun qui pourrait être utilisé dans la recherche d'un cadre plus universel.

Cette recherche de lois, au caractère local ou universel, est la base de la recherche scientifique.

1.2 Observation, expérimental, théorie, modélisation, numérique

La recherche scientifique fait appel à plusieurs approches assez différentes en ce qui concerne les études en environnement : les mesures sur le terrain, appelées « observation », l'expérimental, la théorie, la modélisation et le numérique.

Les mesures sur le terrain sont bien entendu nécessaire dans le domaine de l'environnement : elles apportent ce qu'on appelle la « vérité terrain ». Mais celle-ci est difficile à saisir : l'environnement marin est extrêmement variable, en raison de la turbulence et des autres forçages physiques, et aussi des comportements spécifiques des très nombreux organismes existant au sein de cet environnement. Si l'on se contente de placer un capteur et de mesurer, on obtiendra un signal complexe, très variable dans le temps (et dans l'espace si on bouge la position du capteur). Il n'est pas aisé dans ce contexte de donner un sens à ce qui est mesuré, d'interpréter les variations de la quantité étudiée. Pour donner un sens à ce qui est mesurée, pour chercher à comprendre ses variations, il faut adopter une stratégie d'étude bien spécifique. Cette stratégie d'étude doit être adaptée au cadre théorique dans lequel on se place. Des mesures au hasard, dans le milieu *in situ*, n'apportent aucune connaissance nouvelle en raison de l'absence de stratégie d'échantillonnage. La stratégie d'échantillonnage est donc fortement liée à un cadre théorique pour l'interprétation des données. On voit que finalement, les mesures ne sont pas réalisées en dehors de tout cadre : les mesures doivent

être réalisées dans un cadre théorique. Ceci sera abordé dans le chapitre suivant, portant sur l'introduction des concepts.

Les études expérimentales se réalisent au laboratoire, dans des conditions contrôlées : l'objectif est d'étudier certaines propriétés, réactions, comportements, dans des conditions expérimentales bien particulières. Ces études ne remplaceront jamais les mesures sur le terrain ; elles visent à mieux comprendre comment les systèmes biologiques, chimiques et physiques se comportent, dans des conditions bien contrôlées.

Qu'appelle-t-on condition bien contrôlée ? Pour un système qui peut dépendre de plein de paramètres – concentration en organismes, salinité, température, éclairage, concentration en sels nutritifs, agitation (que nous appelons ici turbulence), concentrations en proies, en prédateurs, – il faut, pour y comprendre quelque chose, fixer autant que possible un grand nombre de facteurs, et faire varier seulement un ou deux facteurs pour étudier le système en laboratoire. Au-delà de deux paramètres, il devient difficile de maîtriser l'espace des possibles du système en question. C'est cela qui correspond à ce qu'on appelle « conditions contrôlées ».

Sur le terrain les conditions extérieures, comme la température, la turbulence, l'environnement, les autres organismes, sont variables et donc non contrôlés. L'objectif des études expérimentales est d'étudier un mécanisme isolément, ou quelques mécanismes en interaction, pour pouvoir tenter de généraliser dans des conditions environnementales ce qui a pu être déduit d'études en laboratoire, en contrôlant autant que possible de nombreux paramètres, et en laissant libre, c'est-à-dire en faisant varier artificiellement seulement 2 ou 3 paramètres. La généralisation dans l'environnement naturel de résultats obtenus en laboratoire en conditions contrôlées, est souvent placée dans la section « discussion et perspectives » d'un article scientifique ; c'est une partie délicate, sujette à caution, tant il est difficile d'imaginer comment des résultats obtenus en laboratoire peuvent se traduire dans l'environnement libre.

Pourquoi avons-nous besoin de théorie ? La théorie est ce qui permet de donner un sens à l'ensemble des études, ce qui permet d'extraire une loi générale à partir de mesures en laboratoire ou sur le terrain. Il peut s'agir d'une vision abstraite du système, proposant des relations analytiques entre les différentes variables, selon des lois mécanique ou probabilistiques bien définies. Il n'est pas toujours possible de disposer ou d'élaborer des nouvelles relations théoriques ; il est même assez rare de pouvoir proposer une nouvelle relation théorique à partir de mesures sur le terrain. Mais les approches théoriques sont surtout utiles pour donner un cadre aux mesures sur le terrain, et s'il faut tester une nouvelle théorie, les mesures sur le terrain sont indispensables.

Ensuite, un nouveau concept : la modélisation. De quoi s'agit-il ? La modélisation est reliée à la théorie. Les modèles sont des versions simplifiées, idéalisées, de théories. Lorsque la théorie est trop complexe pour être résolue, ou trop abstraite, des hypothèses doivent être admises, permettant de simplifier le problème pour l'explorer. Les résultats issus de modèles peuvent ensuite servir à mieux

comprendre le modèle théorique global. Le point important ici est ce bien noter qu'un modèle repose sur une hypothèse simplificatrice. Le modèle ne peut viser qu'à éclairer un aspect d'une théorie. Comme il repose sur une hypothèse il perd de sa généralité et ne peut revendiquer l'universalité. Le modèle ne peut pas apporter la « vérité » scientifique. La vérité d'un modèle repose fondamentalement sur les hypothèses simplificatrices qui ont été adoptées, et qui ont un statut assez arbitraire.

Si la modélisation est reliée à la théorie, elle l'est également au numérique. Le numérique, c'est-à-dire l'utilisation des moyens informatiques, est apparu massivement dans les dernières décennies, et a pris une place de plus en plus importante dans de nombreux domaines scientifiques, incluant les sciences de l'environnement. Le numérique peut être une traduction informatique d'une théorie, mais le plus souvent les programmes informatiques sont appelés des « modèles numériques », et correspondent donc à la traduction informatique d'un modèle. Dans le domaine de l'environnement, les modèles les plus complexes correspondent à la construction d'un monde virtuel simplifié. Ils ne remplacent toutefois pas l'observation, car leurs résultats sont tributaires de la validité des hypothèses qui ont été faites. Si le modèle est trop simplifié, les conclusions ne sont valables que pour le modèle en question. Le modèle virtuel est donc intéressant en tant que tel, mais ses résultats ont une validité limitée par les hypothèses de départ. On n'atteint pas à l'universel par la modélisation.

1.3 Sur le sujet de ce livre : la turbulence et l'écologie marine

Dans un mémoire publié en 1959, le chercheur suisse Heinz Ambühl a été l'un des premiers à reconnaître l'importance de la turbulence dans les processus en écologie marine, et en biologie en général. Il indique ainsi (Ambühl (1959), p. 149, traduction personnelle) :

« Pratiquement tous les écoulements se produisant dans la nature sont turbulents, même dans les eaux stagnantes. Un examen approfondi révèle que ce type d'écoulement est d'une importance extraordinaire pour toute vie dans l'eau, car sans les effets de la turbulence, l'eau ne serait guère concevable comme habitat. Alors que, à la suite de processus de mélange turbulents un échange permanent peut avoir lieu entre les différentes zones d'un plan d'eau, une masse d'eau qui n'aurait que des mouvements laminaires devra s'asphyxier. Un échange, un mélange mécanique de masses d'eau individuelles n'est concevable que par le biais du mouvement turbulent ; le flux laminaire ne permet pas le mélange, mais seulement la compensation par diffusion. »

Le chercheur espagnol Ramon Margalef a plus tard résumé ceci en écrivant (Margalef, 1997) :

« Il n'y a pas de vie sans eau,
et il n'y a pas de vie dans l'eau sans turbulence. »

Le milieu marin, via ses composantes turbulentes, son réseau trophique et ses interactions entre biogéochimie et organismes vivants, est un système complexe. Ce système complexe est multi-échelle, il a des aspects chaotiques, il est déterminé en partie par la turbulence, et son transport d'énergie cinétique, de matières, de nutriments dissous, d'organismes, et il est le siège de nombreux échanges physiques, chimiques et biologiques.

De façon très schématique, les organismes pélagiques en fin de vie sédimentent vers le fond des océans. Ils forment souvent des agrégats en sédimentant, composant ce qu'on appelle la neige marine. Tout au long de cette sédimentation les bactéries marines présentes en grand nombre dans le milieu (des centaines de milliers de bactéries par millilitre d'eau) vont dégrader cette matière organique et régénérer des sels nutritifs (nitrates, phosphates, silicates, etc.). Ceci explique que la concentration en sels nutritifs augmente avec la profondeur. Dans la couche éclairée de la surface (la zone euphotique) les sels nutritifs ont une moins grande concentration, tandis que le phytoplancton, pour sa photosynthèse, a également besoin de lumière, et doit dans rester en surface. C'est la turbulence qui permet de remettre en suspension dans la colonne d'eau les sels nutritifs qui sont concentrés au fond de l'océan, et leur permet de remonter à la surface et nourrir le phytoplancton.

La turbulence permet également au phytoplancton de rencontrer plus efficacement les sels nutritifs, en créant des zones de concentration, également appelés en anglais « patchiness » ou en français hétérogénéité. Cette même turbulence génère de l'hétérogénéité dans les concentrations en sels nutritifs, ce qui permet aussi aux microorganismes de se nourrir et reproduire de façon plus efficace.

La turbulence transporte les gamètes, permet aux organismes benthiques, qui ont pour beaucoup d'entre eux une phase larvaire planctonique, de se transporter et coloniser des espaces avant de se fixer lors des phases fixées de leur stade de vie. Elle permet aussi d'apporter plus efficacement les nutriments aux organismes benthiques filtreurs.

Elle permet enfin d'optimiser le taux de rencontre pour les organismes planctoniques. Ces organismes vivent en effet en suspension dans l'eau ; ils sont de petite taille et de faible densité, ce qui fait que la rencontre, pour la reproduction, demande d'utiliser des stratégies utilisant la turbulence. Le taux de rencontre prédateur-proie, dont dépendent les espèces zooplanctoniques carnivores, comme certains copépodes, ou les larves de poisson, est fortement influencé par la turbulence ambiante.

1.4 Présentation des contenus des différents chapitres

Le chapitre suivant sera un chapitre introductif, consacré à différents concepts, comme le chaos, les couplages physique-biogéochimie, la question des échelles, l'échantillonnage eulérien-lagrangien, les interactions physique-biogéochimie-biologie, la complexité de façon générale.

Les étudiants en écologie marine n'ont pas une vision assez précise des concepts en probabilité. Par exemple, en général ils ne connaissent pas l'expression analytique de la densité de probabilité normale. L'idée du chapitre 3 sera de leur rappeler le concept de densité de probabilité, les différents modèles existant pour les extrêmes, les bases des analyses statistiques, le théorème centrale limite, l'analyse spectrale, les analyses de séries temporelles. Le chapitre 4 présente la turbulence, un des forçages majeurs mais pourtant très mal compris, et très souvent oublié dans les ouvrages en écologie. La présentation est faite de façon à être compréhensible, autant que possible, par les étudiants ne connaissant que peu les équations de la mécanique des fluides. Ceci inclut un passage sur les simulations numériques directes des équations de Navier-Stokes, et une présentation critique des modèles de transport souvent utilisés dans le domaine, sans connaissance de leur contenu, comme une boîte noire. Une part importante est accordée à la diffusion turbulente et à la dynamique de particules, sphériques ou non sphériques, dans un écoulement turbulent.

Les chapitres suivants seront des applications, tout d'abord au plancton, en accordant une place importante au phytoplancton puis au zooplancton. Le chapitre sur le phytoplancton se focalise sur l'étude du phytoplancton dans un environnement turbulent, soit via l'observation, soit via l'expérimentation et les simulations numériques. Une revue de la littérature sur le sujet est présentée. Des analyses dans un cadre eulérien et lagrangien sont exposées. Le cadre général du chapitre est une présentation de concepts en utilisant des données en tant qu'exemples d'applications. Le zooplancton, copépodes, larves d'invertébrés benthiques, larves de poissons, a des comportements de nage en relation avec son environnement. Ces comportements peuvent être assez complexes. Le dernier chapitre, plus court, se consacre à d'autres applications, incluant d'un côté la biogéochimie, puis l'influence de la turbulence sur les organismes benthiques suspensivores. Nous exposons en particulier les dynamiques complexes de microfermetures chez les bivalves.

Pour terminer, nous concluons par des perspectives et une évaluation de sujets encore trop peu explorés dans le cadre interdisciplinaire faisant appel à des collaborations entre mécaniciens des fluides et écologues marins.

Chapitre 2

Présentation de différents concepts

Nous introduisons ici, et discutons, différents concepts utilisés dans le domaine de l'étude des sciences de la nature, ou sciences de l'univers, concepts qui auront une utilité pour les chapitres suivants.

2.1 Déterminisme et chaos

Les équations de la physique classique sont déterministes, ce mot voulant exprimer le fait que le hasard n'y intervient pas. Ces équations s'écrivent sous la forme

$$y(t) = f(y_0; t) \tag{2.1}$$

où t est le temps, y le système étudié $y_0 = y(0)$ la valeur de y pour le temps $t = 0$, f une fonction qui exprime l'évolution de y , et qui peut être très complexe. Ce type de relation ne contient pas de hasard, on dit aussi que ce n'est pas une relation stochastique et ne contient pas de variables aléatoires. Si f et $y(0)$ sont connus, alors $y(t)$ est connu (en théorie) pour tout temps $t > 0$. Le futur de ce type de système est déterminé par la relation déterministe f et par la connaissance d'un état initial $y(0)$. Les lois de Newton, la relativité, les équations de l'électromagnétisme, sont toutes des lois déterministes. Par contre, à plus petite échelle, les équations de la physique quantique font appel à des notions de variable aléatoire : ces équations ne sont plus déterministes.

Et le vivant ? Est-il déterministe ? On touche ici presque à des concepts philosophiques. Un argument célèbre de René Descartes, exprimé dans son *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison, et chercher la vérité dans les sciences*, est que les animaux sont des automates qui ne pensent pas, tandis que les hommes s'en démarquent en étant capables de raisonner et d'exprimer leur pensée. Pour lui la différence entre les hommes et les animaux est que les hommes peuvent

exprimer leur pensée, tandis que les animaux en sont incapables, même les animaux comme les pies ou les perroquets, capables de proférer des paroles, mais pas d'exprimer une pensée (figure 2.1).

On peut aussi aborder le sujet en restant dans le domaine scientifique. Le vivant obéit aux lois de la biochimie, donc de la chimie, et donc de la physique (la biologie est *in fine* de la biochimie, donc de la chimie, et la chimie est *in fine* de la physique, lorsqu'on descend aux échelles atomiques). Le vivant obéit donc à certaines lois qui sont déterministes (gravitation, dynamique des fluides, électromagnétisme classique), et à d'autres lois qui font intervenir l'aléatoire, et qui ne sont donc pas déterministes (la chimie, déterminée par la physique quantique). Ces limites permettent de laisser une place philosophique au libre arbitre, lorsqu'on parle de vivant. En effet, si le monde était purement déterministe, il n'y aurait pas de place pour ce qu'on appelle le libre arbitre, et chaque être vivant (humain compris) pourrait être vu comme un automate obéissant à des lois déterministes.

En fait, le hasard (nous préférons ici parler d'aléatoire, ou de fonctions, ou processus stochastiques, c'est-à-dire qui manipulent des variables aléatoires) peut aussi intervenir lorsqu'on considère des équations déterministes. Lorsqu'on dispose d'une loi décrivant l'évolution d'un système, on appelle ceci un système dynamique (le mot « dynamique » renvoie ici à la dimension temporelle). Certains systèmes dynamiques ont ce qu'on appelle une dépendance sensitive aux conditions initiales. Ce concept date du mathématicien français Henri Poincaré (1854-1912), mais il n'a été redécouvert et exploité que dans les années 1960, avec le développement de l'informatique. L'idée générale peut être illustrée par le jeu du billard : imaginons un billard idéal, sans frottement, de forme rectangulaire avec un plot circulaire au milieu de la table. Une boule de billard, lancée dans une certaine direction, rebondira sur les parois indéfiniment, selon une loi obéissant à la loi de la réflexion (l'angle incident est aussi l'angle de réflexion, par rapport à la perpendiculaire au point de contact avec la paroi). Ce jeu est donc un système dynamique déterministe. Si l'on change de façon minuscule l'angle de la queue de billard, on peut montrer que le plot circulaire au milieu de la table fera que des trajectoires avec une modification minuscule de l'angle de tir sera rapidement extrêmement différentes. On appelle ceci dépendance sensitive aux conditions initiales. Ce terme est un peu long, mais on peut résumer cette propriété en disant que le jeu de billard idéal imaginé ici est chaotique. De nombreux modèles mathématiques ou numériques ont des propriétés chaotiques (pour en savoir plus : Ruelle (1990)).

Comme le futur de ce type de système n'est plus déterminé en pratique, car nous ne pouvons jamais connaître l'état initial avec une précision absolue, ce système dynamique est déterministe en théorie, mais en pratique il n'est pas déterminé. Les solutions de ce type de système ont un caractère aléatoire, et on utilise communément des méthodes provenant des systèmes stochastiques pour les étudier (figure 2.2). En résumé, ces systèmes obéissent à des équations déterministes, qui ne font pas place à l'aléatoire, mais pour les étudier il faut utiliser