



**HAL**  
open science

## Modélisation formelle en sciences expérimentales : problématiques de la transmission

Muriel Ney

► **To cite this version:**

Muriel Ney. Modélisation formelle en sciences expérimentales: problématiques de la transmission. 2007. hal-00190046

**HAL Id: hal-00190046**

**<https://telearn.hal.science/hal-00190046>**

Submitted on 23 Nov 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Mémoire**  
présenté devant l'Université Claude Bernard - LYON I

pour l'obtention de l'  
**Habilitation à Diriger des Recherches**  
(arrêté du 23 novembre 1988 modifié par les arrêtés  
du 13 février 1992 et du 13 juillet 1995)

Par

**Muriel Ney**

## **Modélisation formelle en sciences expérimentales : Problématiques de la transmission**

Soutenue le 20 février 2007

Devant le jury :

Rapporteurs :

Arnaud Martin, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier  
Christian Orange, Centre de Recherche en Education, Nantes  
Cécile Vander Borght, Laboratoire de Pédagogie des Sciences, Louvain-La-Neuve

Examineurs :

Nicolas Balacheff, Laboratoire d'Informatique de Grenoble  
Carlos Bernstein, Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, Lyon  
Dominique Pontier, Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, Lyon

UMR CNRS 5517  
Laboratoire d'Informatique de Grenoble  
46 avenue Felix Vialet  
38031 Grenoble

## Résumé

Cette note de synthèse rédigée en vue de soutenir une habilitation à diriger des recherches (HDR) propose une relecture de mes travaux de recherche sur la modélisation en physique statistique et en écologie comportementale ayant pour but de dégager des problématiques de la modélisation en sciences expérimentales et de les traduire ensuite en problématiques de la transmission. Dans une première partie, je présente mes travaux en me plaçant du point de vue des modèles que j'ai utilisé plutôt que des systèmes, physique ou biologiques, étudiés. Les problématiques de la modélisation auxquelles je m'intéresse tout particulièrement sont communes à tous ces travaux : le rapport expérience/modèle, l'intervention de l'aléa et la transdisciplinarité. Dans une deuxième partie, je m'intéresse à l'enseignement de la modélisation. Je construis une typologie des fonctions des modèles basée sur le rapport entre modèle et expérience. Cette typologie est construite pour le cas particulier des modèles formels (utilisant un formalisme mathématique, statistique ou informatique). Pour chaque type de modèle, une option pédagogique est proposée, en particulier sur l'usage des simulations. Dans le troisième chapitre, la problématique de la cohérence entre le sens de l'apprentissage et l'usage des technologies est soulevée. J'élabore un outil pour reconnaître ou construire cette cohérence. Puis, un projet d'enseignement des outils mathématiques pour les sciences de la vie, couplé à une recherche expérimentale sur l'usage d'un environnement informatique, est présenté. Enfin, mes nouveaux projets de recherche sont décrits dans les perspectives.

**Mots clés** : Apprentissage humain – Didactique des sciences expérimentales – Ecologie comportementale – Environnements informatiques – Modélisation – Physique statistique



## Remerciements

Je remercie Nicolas Balacheff, Carlos Bernstein et Dominique Pontier qui m'ont fait l'honneur de bien vouloir faire partie du jury et tout particulièrement Arnaud Martin, Christian Orange et Cécile Vander Borgh qui ont accepté la tâche de rédiger un rapport sur ce mémoire.

Je remercie Henk Hilhorst qui a dirigé ma thèse au Laboratoire de Physique Théorique et Hautes Energies à Orsay, là où tout a commencé.

Je remercie ceux qui m'ont accueilli dans leur équipe, Mike Moore, Marc Gabay, Michel Peyrard, Peter Young, Marc Mangel, Carlos Bernstein et Patricia Marzin.

Je remercie ceux qui m'ont accordé leur confiance et m'ont permis de devenir membre « permanent » du laboratoire qu'il dirigeait, Jean-Pierre Hansen, Christian Gautier et Nicolas Balacheff.

Merci à Silvio Franz, Tamar Keasar, Mônica Macedot-Rouet et Irène Till-Bottraud pour tous nos échanges intellectuels et amicaux et en particulier Jean-Marie Legay.

Merci aux étudiants qui ont été des collaborateurs privilégiés, Markus Thill, Guillaume Epinat, Isabelle Amat, Marcela Castelo et Clément Maisch.

Merci à toute l'équipe SEED, Cédric d'Ham, Isabelle Girault, Patricia Marzin et Claire Wajeman, éphémère mais solide.

Je remercie mon mari d'avoir participé au développement de plusieurs simulations, mais aussi à ce mémoire en faisant les comptes suivants :

Nombre de jours de recherche effectuées au CNRS depuis 1992 : 2795

Nombre d'heures de nouveaux enseignements dispensés : 264

Nombre de présentations orales effectuées : 48

Nombre de langages de programmation maîtrisés : 4

Dans la liste de publications :

Estimation du nombre de pages d'articles publiées : 960

Nombre de co-auteurs : 27

Nombre moyen d'auteurs par article : 2,73

Pourcentage d'articles publiés dont je suis le premier auteur : 73%

Nombre maximum de citations d'un de mes articles (web of science® 2006) : 47

Nombre minimum de citations d'un article (web of science® 2006) : 1

Et pour finir :

Nombre de laboratoires m'ayant hébergée six mois ou plus : 7

Nombre de pays visités lors des missions : 15

Enfin, je remercie mes enfants de ne pas compter les heures que je passe avec eux et mes parents de ne pas compter les heures qu'ils passent avec mes enfants.

# Sommaire

Parcours	7
----------	---

Introduction	9
--------------	---

---

---

## Chapitre 1 Problématiques de la modélisation en physique et en biologie

---

---

1. Les systèmes désordonnés binaires : modèles pour la physique, outils pour la biologie	18
1.1 Du modèle d'Ising à la biodiversité	
1.2 Du modèle Edwards-Anderson à l'évolution des espèce	
1.3 Du modèle de Hopfield à l'apprentissage chez les bourdons	
1.4. Du modèle de percolation et à la dispersion chez les parasitoïdes	
2. Modélisation en écologie comportementale	30
2.1 Recherche d'optimum	
2.2 Recherche d'ESS	
2.3 Dynamique de population	
3. Des problématiques de la modélisation en sciences expérimentales	46
3.1 Le rapport expérience-modèle	
3.2 L'intervention de l'aléa	
3.3 La transdisciplinarité	
3.4 Conclusion	

---

---

## Chapitre 2 Une typologie des fonctions des modèles formels

---

---

1. Introduction : quelques définitions	54
2. Unité d'enseignement de modélisation en biologie	56
2.1 Faut-il enseigner la modélisation ?	
2.2 Comment enseigner la modélisation à l'université	
2.3 Options pédagogiques pour l'enseignement de la modélisation	
3. Les modèles vus par les scientifiques qui les conçoivent	64
4. Un cadre théorique pour une typologie des fonctions de modèles	68

5. Les fonctions des modèles	74
5.1 « Calculer » : un modèle pour résoudre un problème ou prédire quantitativement ce qui pourrait se passer	
5.2 « Expliquer » : un modèle pour expliquer ce qui est ou ce qui se passe	
5.3 « Décrire » : un modèle pour reproduire ce qui se passe et/ou prédire qualitativement ce qui pourrait se passer	
5.4 « Indiquer » : un modèle pour s'orienter, comprendre, décider et prédire le sens des choses, des phénomènes	
6. Conclusion	86

---

### Chapitre 3 Apprentissage expérimentiel de la modélisation en sciences expérimentales

---

1. Introduction	90
2. Quel rôle pour les technologies de l'éducation ? Quelle éducation ?	93
1.1 Introduction	
1.2 Motivation pour un outil de discernement	
1.3 La carte des sens de l'expérience pédagogique	
3. Enseigner les mathématiques pour les sciences de la vie	105
2.1 Introduction	
2.2 Le contexte du projet MathSV	
2.3 L'environnement informatique d'apprentissage MathSV	
2.4 Recherche expérimentale	
2.5 Méthodologie pour faire évoluer la pédagogie en TT : apprentissage par problème basé sur un environnement informatique	
Perspectives	125
Epilogue	135
Références	137
Liste de publications	149

*« a scientist's achievement may lie in many different areas: As an innovator (new discoveries, new theories, new concepts), as a synthesiser (bringing together scattered information, sharing relationships and interactions, particularly between different disciplines, like genetics and taxonomy), as a disseminator (presenting specialized information and theory in such a way that it becomes accessible to non-specialists [popularizer is a misleading term]), as a compiler or cataloguer, as an analyst (dissecting complex issues, clarifying matters by suggesting new terminologies, etc.), and in other ways. »*

Ernst Mayr écrivant à Will Provine (1979), cité par W. Provine (2005).

## Parcours

Au cours de mes premières années universitaires, ma passion pour les mathématiques s'est élargie à la physique quantique qui m'a séduite par les questions épistémologiques qu'elle soulève. Après avoir obtenu une licence de mathématiques à l'université Paul Sabatier de Toulouse, j'ai donc entrepris des études de physique à l'Ecole Normale Supérieure (ENS) de Paris, en magistère, puis une thèse de physique statistique (1989-1992) à l'université Paris-Sud. En 1992, je deviens chargée de recherche au CNRS, affectée au laboratoire de physique de l'ENS de Lyon (dirigé par Jean-Pierre Hansen).

Le souci de poser et résoudre des problèmes humains et non de faire de la science désincarnée m'a guidée tout au long de mon parcours et m'a conduite de la modélisation en sciences expérimentales à la didactique et aux environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH).

Après huit années de recherche sur des modèles de physique statistique (1989-1997), j'ai étendu le domaine d'application de mes modèles à l'écologie comportementale, où j'ai pu réutiliser certaines méthodes issues de la physique. J'ai commencé à m'intéresser à la modélisation en écologie lors d'un séjour de trois années aux Etats-Unis, à l'université de Californie, Santa Cruz. J'ai continué dans cette voie à mon retour en France, en intégrant le laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive de Lyon dirigé par Christian Gautier (2000-2005).

Au printemps 2001, C. Gautier répond à un appel d'offre INCA de la région Rhône-Alpes et s'engage dans le projet ambitieux de mettre à disposition de tous, sur Internet, les enseignements dispensés par les membres du laboratoire, enseignements dont l'originalité se situe dans l'interdisciplinarité mathématiques/informatique/biologie. Dans ce contexte et en collaboration avec une équipe d'enseignants-chercheurs, j'ai été co-responsable de la conception et la réalisation d'un site web interactif ainsi que d'un dispositif pédagogique innovant (projet MathSV, chapitre 3). Afin de m'impliquer plus complètement dans tous les rôles de l'enseignant-chercheur, j'ai obtenu une délégation d'un an à l'Université Lyon 1 (2003/2004). Le projet MathSV m'a montrée la complexité de telles innovations et m'a questionnée sur ses aspects didactiques, psychosociologiques, organisationnels, voire institutionnels, un questionnement qui m'a conduit à envisager une nouvelle orientation de mes recherches. Aujourd'hui, mon objectif en recherche est de modéliser la conception des situations pédagogiques basées sur les environnements informatiques et d'étudier leurs usages par les apprenants concernés. Dans ce but, j'ai intégré le laboratoire Leibniz à Grenoble (dirigé par Nicolas Balacheff), en septembre 2005.

Depuis le début de ma thèse en 1989, mes travaux de recherche sont axés sur la modélisation, avec des modèles phénoménologiques, des modèles mathématiques ou bien des modèles numériques mais, pour la plupart, des modèles probabilistes (chapitre 1). Mes recherches en didactique et sur les EIAH vont donc plus particulièrement se focaliser sur l'apprentissage de compétences en modélisation et de connaissances mathématiques pour les sciences expérimentales, biologiques ou physiques (chapitre 2).



## Introduction

Quel rapport les mathématiques entretiennent-elles avec les autres disciplines ? Citons, pour ce qui nous concerne, les interactions croissantes entre biologie et mathématiques, ou plus anciennes entre physique et mathématiques. Un rapport<sup>1</sup> récent du Centre de Recherches sur l'Enseignement des Mathématiques (CREM) souligne le contraste étonnant entre l'interaction très forte des mathématiques avec les autres sciences, et le peu de relation de leur enseignement avec les autres enseignements scientifiques. Ces disciplines sont le plus souvent enseignées dans des cours distincts, dans l'enseignement mono-disciplinaire si répandu. Cependant, l'interaction entre les mathématiques et les autres sciences est actuellement un sujet qui suscite un fort intérêt, comme en témoignent notamment les nombreux rapports et colloques des associations professionnelles (comme la Société Mathématique de France, les enseignants de mathématiques des INSA, etc).

La modélisation est une des interfaces entre les mathématiques et la biologie ou la physique. Dans ce mémoire, nous nous intéressons à l'enseignement des sciences expérimentales par les modèles. Cependant, comme le souligne le rapport du CREM, si les programmes scolaires de mathématiques incitent déjà depuis quelques années au rapprochement avec les autres disciplines, « *la réalité est sensiblement différentes : il ne suffit pas de décréter la liaison avec les autres disciplines pour qu'elle vive de façon effective, car elle demande un changement de vision et de pratiques qui n'est pas facile à réaliser.* »<sup>1</sup> En effet, la mise en oeuvre des programmes de mathématiques des années 70 préconisant « *l'étude de situations issues de discipline comprenant une phase de modélisation et une phase d'interprétation des résultats* »<sup>1</sup> est lente et difficile. Des innovations existent cependant, à tous les niveaux. L'enseignement des statistiques dans les programmes du lycée progresse et ouvre des perspectives de coopération avec les sciences expérimentales. Les TPE (travaux personnels encadrés) qui offrent un cadre institutionnel à la coopération entre disciplines, affichent, pour les années 2006/2007 et 2007/2008, le thème « modèles et modélisation ». Au-delà du baccalauréat, des cursus mixtes physique/mathématiques (e.g. ENS Paris) ou biologie/mathématiques/informatique (e.g. ENS Paris, Lyon I, Marseille I) commencent à voir le jour.

### **Déterminer le « sujet » de la modélisation, « c'est le problème de qui ? »**

Lorsque l'on parle de la modélisation, il est possible de prendre plusieurs points de vue : celui du chercheur ou de l'expert, celui de l'enseignant ou de l'étudiant, pour ceux qui nous préoccupent ici. Dans un contexte académique, ce sont des expérimentateurs

---

<sup>1</sup> Publié dans le bulletin de l'APMEP n°458, p. 354-374 sous le titre : « L'enseignement des mathématiques en relation avec les autres disciplines. »

qui adaptent ou utilisent des modèles ou des théoriciens qui les conçoivent. Par ailleurs, il y a ceux qui utilisent ou adaptent des modèles dans des contextes d'expertise : par exemple dans le cadre de la gestion forestière, de la conservation des espèces, de la gestion de pêcheries. Dans le contexte de l'enseignement, différents acteurs sont concernés et cela pose plusieurs questions. Qui prend en charge l'enseignement de la modélisation ? est-ce le professeur de mathématiques, le professeur des sciences de la vie et de la terre ou de physique et chimie, ou bien doit-on construire un cours dédié à la modélisation (et à la simulation qui lui est souvent associé) basé sur la collaboration entre plusieurs de ces professeurs ? Une autre question est celle de savoir qui sont les élèves, ou plus précisément, à partir de quand va-t-on commencer à les initier à la modélisation ? On peut penser que cela débute au lycée, au début de l'enseignement supérieur ou bien seulement au niveau d'un master.

Quels sont les buts de celui qui construit des modèles en physique ou en biologie ? Il peut s'agir de comprendre un phénomène en l'analysant (découper le système, isoler des facteurs, émettre des hypothèses, ...), d'expliquer un phénomène par un mécanisme rationnel. Le but peut être aussi de prédire l'existence ou le déroulement du phénomène, les risques, ou de remplacer une expérience par un simulateur (basé sur un modèle). Ces buts peuvent se superposer. Le chercheur et l'étudiant n'auront pas la même démarche mais peuvent partager certains de ces buts. Le chercheur cherche à donner du sens au phénomène, il fait un travail intérieur de modélisation, de formalisation, il transpose son expérience dans un registre formel. L'élève doit souvent apprendre à modéliser des problèmes particuliers et non à modéliser en général. Le chercheur élabore un processus de connaissance et l'élève va éventuellement reproduire ce processus. Leur rapport à la réalité, à l'expérience qu'ils ont de la réalité, peut donc se ressembler. En ce sens, le rapport entre expérience et modèle nous apparaît comme central à la modélisation. La construction de notre compréhension et du sens se fait au travers de nos expériences et de la résolution de situations problématiques.

### **Analyser les « objets » (les conditions et les composantes) de la modélisation.**

Nous parlons de modélisation formelle en sciences expérimentales. Les sciences expérimentales sont la physique, la biologie, la chimie, mais aussi la psychologie, etc. Seules les deux premières seront abordées dans ce mémoire.

Les modèles formels sont essentiellement des modèles mathématiques, statistiques ou numériques. Ils permettent de passer du stade discursif (un modèle verbal) ou schématique (un modèle symbolique) au stade formel, et bien souvent de quantifier des résultats. Dans les deux disciplines citées, la physique comme la biologie, on peut distinguer deux approches : les modèles déterministes et les modèles probabilistes. Il s'agit de deux approches bien différentes bien qu'elles peuvent être utilisées en parallèle sur un même problème (par exemple un problème de dynamique de populations, chapitre 2).

Dans le contexte particulier des sciences expérimentales, le modèle peut être un

instrument, par exemple pour les expérimentateurs physiciens ou biologistes. Pour Legay (1973, p26), le modèle est un « *outil méthodologique* » pour la production de connaissances dont la construction n'est pas forcément complexe mais dont la conception est toujours difficile. La difficulté vient de la complexité de la réalité, ou plus exactement de ce que JM Legay appelle la prise de décision de la complexité (le fait de prendre conscience et de prendre en compte la complexité de la réalité). Nous nous intéresserons dans ce mémoire aux situations d'apprentissage où les étudiants construisent des modèles formels en réponse à des problèmes de science ; la conception de nouveaux modèles formels étant réservée en général aux initiés, chercheurs ou experts. Cette distinction entre construction et conception est analogue à la différence qu'il y a entre construire une maquette avec un kit de construction, plus ou moins complet, dans le but de répondre à une question, et concevoir une nouvelle maquette.

### **Comment enseigner et apprendre les sciences par les modèles ?**

Apprendre la démarche de modélisation formelle comprend en général plusieurs aspects : (i) apprendre à bien poser le problème (énoncer correctement le problème verbalement de manière à pouvoir le formaliser ensuite, sélectionner une stratégie de modélisation appropriée, définir les bonnes variables), (ii) apprendre à traduire une information verbale en modèle formel, (iii) apprendre à analyser des modèles existants, (iv) apprendre à interpréter des résultats, des prédictions du modèle (Gross, 1992).

Le cadre d'apprentissage choisi ici est celui de l'apprentissage expérientiel, autrement dit la prise en compte par l'enseignant de toute la richesse de l'expérience vécue par la personne qui apprend. En effet, l'expérience agit sur l'apprenant, le transforme autant par ce qu'elle lui apprend (le contenu de l'expérience) que par la façon dont elle lui apprend : vivre une expérience ne consiste pas à comprendre un contenu, une pensée, de façon abstraite et désincarnée mais fait aussi appel aux émotions, aux sensations, aux sens. Apprendre se construit avec de nombreuses autres expériences que celles qui sont purement mentales. Dans ce contexte, les moyens pédagogiques pertinents pour nous seront ceux qui permettent de construire des situations « à vivre » par l'apprenant.

On peut alors s'interroger sur ce que pourrait être un apprentissage expérientiel de la modélisation en sciences expérimentales : en quoi faire fonctionner tel ou tel modèle formel témoigne-t-il d'une expérience humaine ? Quel est le cheminement expérientiel (et pas seulement mental) de l'apprenant en situation de découvrir et comprendre un phénomène ? Comment individualiser ce cheminement ? Comment utiliser les technologies et les environnements informatiques comme vecteur de l'expérience pédagogique vécue par l'apprenant, comme « paysage » dans lequel l'apprenant chemine ?

La question des technologies se pose ici pour deux raisons : car elles peuvent être un enjeu de la transformation des situations et des méthodes d'apprentissage et parce qu'elles peuvent contribuer à améliorer la qualité de l'expérience vécue par l'étudiant.

En effet, les environnements informatiques, Internet et les autres moyens technologiques actuels, sont une aide précieuse pour créer ces situations « à vivre » par les apprenants. Ces moyens ont des avantages, comme leur flexibilité et leur facilité d'accès, mais aussi leurs capacités multimedia et leur potentiel scénographique.

### **Les trois chapitres du mémoire.**

Premier chapitre :

L'objectif de ce chapitre est de rapporter mon expérience de la modélisation et en tirer des problématiques. Je présente mes travaux en me plaçant du point de vue des modèles que j'ai utilisés, tandis que les sujets de modélisation sont présentés dans quatre encadrés (les systèmes étudiés en physique statistique et en écologie comportementale et les questions de recherche associées). Pour les résultats de ces travaux, on pourra se reporter aux articles joints en annexes. Il y a trois problématiques transversales qui sont mises en avant : le rapport expérience/modèle, l'intervention de l'aléa et la transdisciplinarité. Elles seront ensuite déclinées en questions plus précises dans les chapitres suivants, dans le contexte de l'enseignement et de l'apprentissage.

Deuxième chapitre :

L'objectif de ce chapitre est de construire une typologie des fonctions des modèles à partir d'une analyse du rapport entre modèle et expérience. J'explore le lien entre la manière dont on modélise en tant qu'expert ou chercheur et la manière dont on apprend à modéliser en tant qu'étudiant, et j'admets que ce lien repose sur le rapport entre l'expérience de celui qui modélise et le modèle. La typologie est construite pour le cas particulier des modèles formels (utilisant un formalisme mathématique, statistique ou informatique). Ces fonctions des modèles sont de « calculer », « décrire », « expliquer » ou « indiquer ». Pour chaque fonction, une option pédagogique est proposée, en particulier sur l'usage des simulations. Des pédagogies et des usages des outils de simulations privilégiés pour chaque fonction sont présentés.

Troisième chapitre :

La problématique de la cohérence entre le sens de l'apprentissage et l'usage des technologies est soulevée. L'élaboration d'un outil original est présenté. Il permettra de discerner différentes postures possibles pour l'enseignant en situation de concevoir une expérience pédagogique. Une grande partie de ce chapitre est dévolue à un projet d'enseignement et de recherche sur les outils mathématiques pour les sciences de la vie (le projet MathSV). L'environnement informatique et les choix pédagogiques sont décrits. Les résultats d'une recherche expérimentale à grande échelle, auprès de trois sections de Licence première année de Lyon I, sont discutés. Je termine par l'ébauche d'une méthodologie destinée à élucider le cheminement de l'apprenant en situation de découvrir et formaliser la variabilité statistique (du vivant) et à construire un module pédagogique correspondant.

# Chapitre 1

## Problématiques de la modélisation en physique et en biologie



**Objectif :** rapporter mon expérience de la modélisation et en tirer des problématiques.

**Résumé :** je présente mes travaux en me plaçant du point de vue des modèles que j'ai utilisés, tandis que les sujets de modélisation, les systèmes étudiés en physique statistique et en écologie comportementale, sont présentés dans quatre encadrés. Les problématiques de la modélisation auxquelles je m'intéresse tout particulièrement et qui ont émergé de ces travaux sont présentées à la fin de ce chapitre : le rapport expérience/modèle, l'intervention de l'aléa et la transdisciplinarité.

## 1. Les systèmes désordonnés binaires : modèles pour la physique, outils pour la biologie

Les modèles présentés ici sont issus pour la plupart de la physique statistique, comme en témoignent les applications qui les ont initiées : le ferromagnétisme pour le modèle d'Ising, les verres de spin pour le modèle Edwards-Anderson, les réseaux de neurones pour le modèle de Hopfield et enfin le modèle de percolation qui a suscité de nombreuses applications et développements en physique bien que né de l'imagination d'un mathématicien.

La physique statistique, une des théories fondamentales de la physique, permet de résoudre des problèmes où interviennent un très grand nombre de variables couplées. Ces problèmes étaient, à l'origine, de nature déterministe et portaient sur des fluides décrits au niveau moléculaire par les équations du mouvement de la mécanique. Ensuite, il a été possible de traiter des problèmes de nature stochastique de façon analogue.

Dans une expérience de physique, il n'est pas toujours possible, ni nécessaire, de prévoir la valeur exacte que prendra une certaine quantité. Dans le cas où l'on ne dispose d'aucune information sur cette valeur, on suppose que toutes les valeurs possibles sont équiprobables (plus précisément, dans le langage de la physique statistique, toutes les configurations microscopiques, exprimées en coordonnées canoniques, et compatibles avec les contraintes extérieures connues, telle qu'une énergie totale donnée, sont supposées équiprobables). La totalité des configurations possibles associées à leurs probabilités de réalisation permet de définir (et il y a plusieurs façons de le faire) un des ensembles statistiques à la base des méthodes de calcul de la physique statistique.

Ainsi, la physique statistique s'attache à expliquer des propriétés macroscopiques de systèmes constitués d'un grand nombre de composants, à partir d'une description au niveau microscopique. Typiquement, le lien entre les deux niveaux est fait en écrivant une grandeur physique macroscopique comme la valeur moyenne (dans un sens précis) d'une grandeur microscopique.

La physique statistique a d'abord été utilisée pour étudier la thermodynamique et les transitions de phase dans des systèmes physiques. De nombreuses applications, en dehors du domaine d'origine, sont aujourd'hui explorées, en particulier sur les systèmes complexes, dans des domaines comme l'économie (e.g. Potters et al 1998, Weisbuch et al 2000), la neurophysiologie (e.g. Nadal 1993), l'écologie (voir plus bas), etc. La physique statistique propose des techniques de résolution analytiques, exactes ou par approximations, ce qui en fait un des intérêts pour les autres domaines. Des méthodes

numériques ont aussi été développées comme les simulations Monte Carlo (créée, à l'origine, pour la physique de la matière condensée).

Les systèmes désordonnés binaires : qu'est-ce que c'est ?

Les systèmes binaires, sur lesquels nous nous focalisons ici, sont ceux pour lesquels une propriété locale ne peut se réaliser que de deux façons. Ces systèmes sont souvent modélisés sur des réseaux et cette propriété se réalise en général sur un noeud de ce réseau comme résultat d'une interaction avec les noeuds voisins.

Les systèmes désordonnés possèdent deux types de variables microscopiques, et deux échelles de temps de variation associées. Certaines variables évoluent rapidement avec le temps et d'autres variables évoluent lentement et sont modélisées par des variables aléatoires. Les propriétés du système dépendent alors non pas d'un tirage particulier de ces variables mais des paramètres de leur distribution de probabilité. Cependant, ce caractère aléatoire, « désordonné », au niveau microscopique se traduit par des comportements macroscopiques reproductibles.

## 1.1 Du modèle d'Ising à la biodiversité

Le modèle d'Ising (1925) permet de représenter un grand nombre de situations physiques. Les caractéristiques essentielles de ce modèle sont :

- Un réseau, régulier ou non :  
par exemple une grille bidimensionnelle aux mailles carrées.
- Les nœuds du réseau portent une variable prenant 2 valeurs (2 états) :  
 $S_i = \pm 1$
- Les liens du réseaux sont les interactions entre noeuds :  
par exemple chaque paire de proches voisins  $\langle i,j \rangle$  interagit avec une amplitude  $J$ .
- Un paramètre de contrôle :  
par exemple la « température »,  $T$ .

Dans la version la plus simple du modèle d'Ising, le Hamiltonien (la fonction énergie qu'il s'agit de minimiser si  $T=0$ ) s'écrit

$$H = -J \sum_{\langle i,j \rangle} S_i \cdot S_j$$

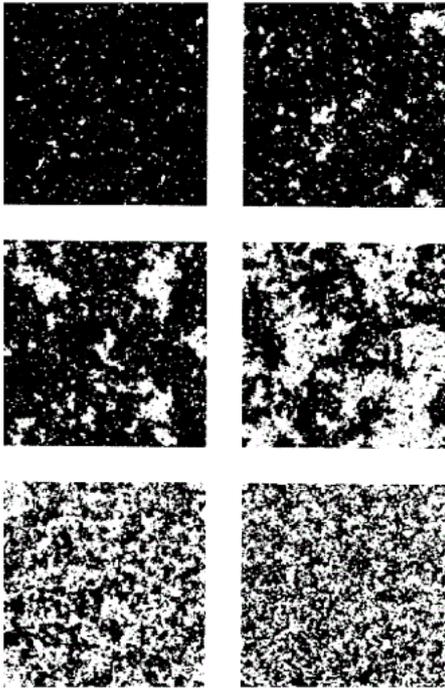
Si  $J > 0$ , l'interaction est dite « ferromagnétique » et tend à aligner les deux spins ( $S_i \cdot S_j = 1$ ), en effet le minimum d'énergie est obtenu si  $J S_i \cdot S_j$  reste positif. Inversement, si  $J < 0$ ,

l'interaction est dite « antiferromagnétique » et tend à anti-aligner les spins voisins ( $S_i \cdot S_j = -1$ ).

Ce modèle a ouvert le champ de recherche sur les phénomènes critiques et il reste un modèle de prédilection pour les étudier puisqu'il est assez simple pour permettre des développements analytiques et en même temps assez compliqué pour posséder une transition de phase critique non-triviale.

Le modèle d'Ising est donc un modèle privilégié pour expliquer certaines transitions de phase macroscopique à partir de la description microscopique d'un mélange binaire. Une grandeur macroscopique qui caractérise la transition est l'aimantation (calculée à partir d'une moyenne des orientations des spins individuels, des  $S_i$ ). A température nulle, il y a deux configurations des spins qui minimisent l'énergie, soit ils sont tous positifs,  $S_i = 1$ , soit ils sont tous négatifs,  $S_i = -1$ . Puis, sous l'effet de la température (le paramètre de contrôle), des îlots d'une phase vont se constituer dans une « mer » de la phase opposée : l'ensemble des spins va se structurer en une mosaïque compliquée d'agrégats de -1 ou de 1, perçue comme aléatoire par un observateur macroscopique (figure 1). On peut dire, en quelque sorte, que la température contrôle le hasard. Dès que l'on dépasse la température transition, l'aimantation s'annule car il y a autant de spins +1 que de spins -1 en moyenne. On parle de la « phase désordonnée » ou « phase paramagnétique ». Pour autant, cela n'en fait pas un système désordonné dont on verra la définition dans la section suivante.

Ce modèle se prête particulièrement bien aux simulations numériques sur ordinateur. Dans un de mes articles (Ney-Nifle et Mangel 2000), j'utilise un algorithme (Kawasaki 1979) basé sur le modèle d'Ising, afin de générer des configurations binaires : présence ou absence de l'espèce végétale sur un site. L'intérêt d'utiliser ce modèle était de pouvoir générer des paysages d'agrégats désordonnés tout en contrôlant le degré d'agrégation. En terme biologique, ces agrégats représentent les îlots d'individus d'une même espèce et l'on souhaite représenter des espèces dont les îlots sont plus ou moins gros et plus ou moins nombreux et rapprochés (voir l'encadré « la biodiversité » pour une présentation de la problématique). En terme physique, ce sont les agrégats de spins dont la forme et le nombre évoluent avec le temps (figure 1). Le degré d'agrégation de l'espèce est donc contrôlé par le temps de simulation.



*Figure 1*

Configurations des spins pour six températures proches de la température de transition. En haut à gauche, en dessous de la température de transition, la majorité des spins sont alignés (ici en noir). En bas à droite, au dessus de la température de transition, on se trouve dans la phase paramagnétique (ou désordonnée). Il y a autant de spins dans un sens que dans l'autre (noir et blanc).

## 1.2 Du modèle Edwards-Anderson à l'évolution des espèces

Certains matériaux magnétiques appelés « verres de spin » (voir l'encadré « le chaos dans les verres de spin »), dont une propriété caractéristique est de posséder une phase basse-température magnétiquement vitreuse, sont décrits par le modèle Edwards et Anderson (1975). Ce modèle est basé sur un hamiltonien plus général que celui d'Ising :

$$H = \sum_{i,j} J_{ij} S_i S_j$$

Ce nouvel hamiltonien a plusieurs variantes (je ne citerai ici que les cas me permettant de situer mes propres contributions). Un exemple est le verre de spin d'Ising où l'on considère des spins d'Ising à une seule composante binaire,  $S_i = \pm 1$  (e.g. Nifle 1992). Un autre exemple est la version « champ moyen » pour laquelle chaque spin est en interaction avec tous les autres (Franz et Ney-Nifle 1995). Enfin, dans le modèle dit modèle XY, les spins sont des vecteurs planaires (e.g. Ney-Nifle et Hilhorst 1995). De plus, on peut voir sur l'équation ci-dessus que ce hamiltonien se réduit à celui du modèle d'Ising si les interactions sont constantes  $J_{ij} = J$ .

Ce modèle est un prototype pour les systèmes désordonnés et frustrés.

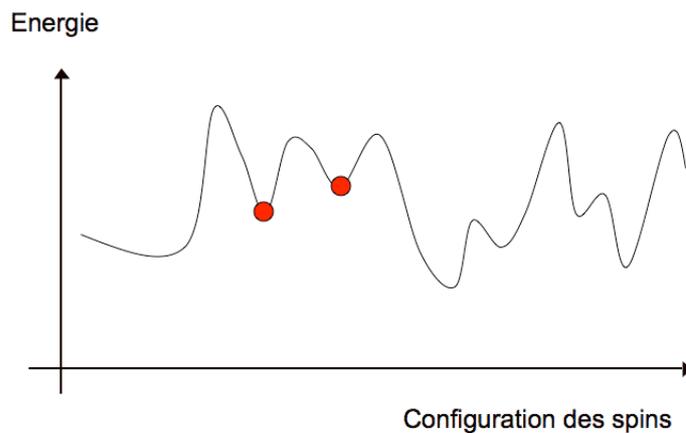
Les systèmes désordonnés sont ceux dans lesquels coexistent au moins deux échelles de temps très différentes. Les degrés de liberté se séparent en deux ensembles. Dans le premier, les variables rapides (ici les spins) atteignent rapidement l'équilibre. Dans le second ensemble, les variables lentes (ici les interactions entre spins) évoluent si lentement qu'elles sont considérées comme gelées. Ces degrés de liberté lents sont en très grand nombre et ne présentent aucun ordre apparent. De plus, leurs valeurs expérimentales dépendent de manière complexe de la préparation du système. Dès lors, il paraît justifié de remplacer ces données par des variables aléatoires fixes. Cela conduit à exprimer certaines propriétés du système en fonction des paramètres de la loi de distribution (et non plus d'un échantillon particulier de cette distribution). Ceci peut s'illustrer sur l'exemple des matériaux verres de spin (figure 5).

De plus, dans le modèle Edwards-Anderson, le désordre s'accompagne de frustration : il est impossible de minimiser tous les termes du hamiltonien en même temps. Cette situation est due à la présence, conflictuelle, d'interactions de signes différents, un spin subissant une interaction avec tous les spins voisins tendant à l'aligner ou l'anti-aligner avec eux. Ces interactions vont générer un conflit, une frustration, lorsque le spin ne peut pas satisfaire toutes les interactions avec ses voisins à la fois.

Un tel modèle conjuguant les propriétés de désordre et de frustration se distingue de par sa transition de phase vers une phase basse température dont l'étude est particulièrement complexe, même à l'état fondamental ( $T = 0$ ). A température élevée, le système se trouve dans la phase paramagnétique décrite plus haut pour le modèle d'Ising. A basse température, en dessous de la température de transition, les spins se gèlent dans des directions qui peuvent paraître aléatoires, à cause de la frustration et du désordre, mais qui sont déterminées. La dynamique des variables dites rapides (ici les spins,  $S_i$ ) ralentit ce qui peut s'expliquer qualitativement (figure 2).

L'énergie est représentée comme une fonction des configurations des spins. Celle-ci a un grand nombre de vallées et de monts. L'existence de barrières à franchir pour passer d'une vallée à une autre, afin d'atteindre un minimum, fournit une explication qualitative au ralentissement de la dynamique.

J'ai travaillé plusieurs années sur les phénomènes de chaos dans les verres de spin (voir encadré). Par ailleurs, les modèles de verres de spin ont été utilisés par des physiciens pour étudier différents problèmes issus de la biologie, comme celui de la différenciation cellulaire ou de l'évolution des espèces par sélection (e.g. Weisbuch, 1989).



*Figure 2*

Des configurations éloignées (sur l'axe des x), c'est-à-dire très différentes du point de vue de la direction de chaque spin, peuvent avoir une énergie proche (sur l'axe des y). De plus, deux configurations correspondant à deux vallées (les deux points) séparées par une « barrière », un mont élevé, sont proches du point de vue de leur structure, mais éloignées du fait de cette barrière.

### 1.3 Du modèle de Hopfield à l'apprentissage chez les boudons

Le modèle de Hopfield a suscité un regain d'intérêt pour les réseaux de neurones (modèles formels de neurones interconnectés) au début des années 1980. Son apport majeur est d'avoir exprimé la recherche d'une configuration par le réseau de neurones comme la recherche du minimum d'une fonction (Nadal 1993). De plus, J. Hopfield (1982) fait un parallèle avec le modèle des verres de spin ce qui permet la transposition de résultats obtenus sur ce modèle (dans sa version champ moyen, voir plus haut) au cas des réseaux de neurones (Weisbuch 1989).

Les neurones sont connectés entre eux et l'efficacité, ou amplitude, de cette connexion est représentée par des poids,  $W_{ij}$ . Chaque neurone est à la fois une entrée et une sortie pour les autres (figure 3). La connexion est symétrique dans ce modèle :  $i$  vers  $j$  et  $j$  vers  $i$ . Les neurones sont binaires comme dans les modèles précédents ; ils sont dans deux états possibles,  $X_i = 0$  ou  $1$ , inactif ou actif. Un neurone devient actif si la somme pondérée des signaux reçus des autres neurones est supérieure à un certain seuil.

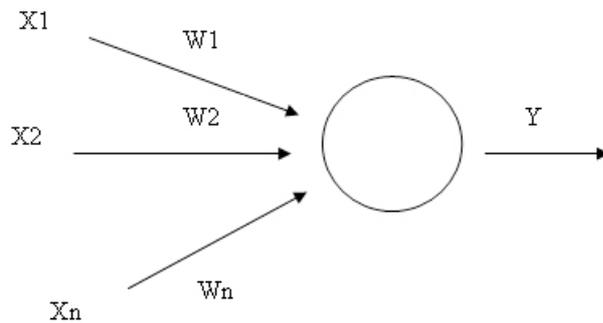


Figure 3

Les neurones sont interconnectés par des liens. Ces liens ont tous un poids,  $W_i$ , qui modélise l'influence des neurones entre eux. La somme des poids des liens qui vont vers un neurone doit dépasser un certain seuil, qui varie d'un neurone à l'autre, pour que celui-ci émette une valeur de sortie, ici  $Y$ . Cette valeur de sortie va à son tour influencer d'autres neurones.

La fonction qui permet de définir et calculer l'énergie d'une configuration de neurones possible est

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} w_{ij} x_i x_j$$

Certaines configurations sont apprises par le réseau qui met à jour des poids et les seuils de façon à correspondre à des minimums locaux (attracteurs) de cette fonction d'énergie. Ces configurations sont présentées au réseau successivement et le construisent. C'est un processus de stockage des configurations que l'on appelle une mémoire associative. Une fois ce processus pour établir les valeurs des poids effectué, la mémoire peut fonctionner : des configurations soumises au système et proches d'un attracteur vont tendre vers cet attracteur sous la dynamique encodée dans les poids.

Quel est le lien avec le modèle de verre de spin précédent ? Un réseau a une capacité de mise en mémoire limitée. Trop de configurations apprises conduit à une matrice des connexions  $[W_{ij}]$  pratiquement aléatoire. On retrouve alors le modèle des verres de spins qui correspond donc à un système ayant une mauvaise mémoire.

J'ai utilisé un modèle de réseau de neurone non pas pour étudier ce modèle en tant que tel mais comme outil d'analyse de données temporelles issues d'une expérimentation sur le butinage des bourdons (au moment où des travaux originaux

venaient tout juste d'être publiés, Montague et al 1995 et Schultz et al 1997). Mes données étaient issues du « beehave lab » décrit dans l'encadré « interactions plantes-pollinisateurs » (section 2). Il s'agissait d'analyser une série temporelle de choix de fleurs artificielles par des bourdons : choix que nous avons codés binaires car le bourdon avait le choix entre un amas de fleurs bleues et un amas de fleurs jaunes (Ney-Nifle et al 2000). Le but était de caractériser les patrons de choix et d'en déduire les stratégies sous-jacentes du comportement du bourdon, que ce soit en régime de croisière ou bien juste après une perturbation (un changement opéré par l'expérimentateur, comme par exemple une réorganisation des amas de fleurs).

Dans notre modèle (Ney-Nifle et Keasar 1998), un bourdon est un réseau de neurones. A chaque pas de temps, il prédit la récompense (le nectar) qu'il peut tirer de la prochaine visite de fleur. Après cette visite, une fonction erreur est calculée qui compare ce qui est réellement récolté avec la prédiction. De cette erreur dépend le choix de la visite suivante. Une erreur dans le sens « pire que prévu » entraîne une réorientation (quitter l'amas) avec une forte probabilité. Une erreur dans le sens « mieux que prévu » encourage l'animal à persister dans son choix (rester sur l'amas). Cette stratégie dépend d'inputs externes que sont les stimuli visuels (caractéristique des fleurs sur les amas) et des poids de ces différents stimuli qui sont mis à jour à mesure que l'animal apprend (une préférence pour un type de fleurs pouvant évoluer au court du temps).

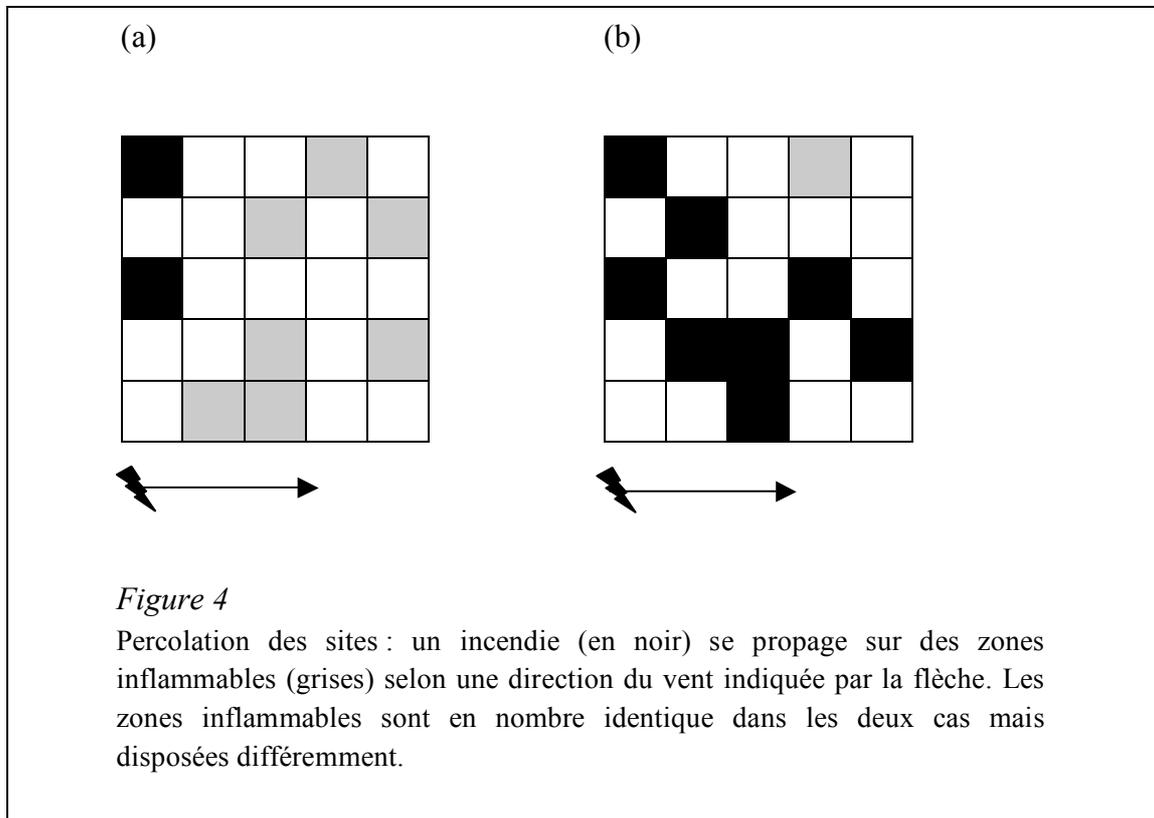
Ce modèle a permis, entre autre, de montrer que « tout se passe comme si » le bourdon mémorise entre 3 et 6 visites d'affilées et qu'il suit une stratégie s'apparentant plus à l'échantillonnage (tester régulièrement des amas pour suivre l'évolution de la quantité de nectar) que du simple va-et-vient aléatoire entre amas (qui ne demande pas de mémoriser les visites précédentes).

#### **1.4 Du modèle de la percolation à la dispersion chez les parasitoïdes**

Dans le domaine des mathématiques, l'étude de la percolation tire son origine d'une question posée en 1954 par S.R. Broadbent sur la pénétration d'un fluide ou d'un gaz, dans un labyrinthe formé de passages ouverts ou fermés (Pajot, 2001). J.M. Hammersley, estimant que la singularité du problème nécessitait une terminologie qui lui soit propre, propose de le baptiser du nom de « percolation », par analogie avec la fabrication du café dans un percolateur.

Le modèle de la percolation permet d'étudier les phénomènes qui se propagent dans l'espace au cours du temps, comme un incendie dans une forêt ou de l'eau au travers d'une couche de café en poudre. Prenons le cas des incendies de forêts. Au cours de son déplacement, le feu rencontre des zones qui sont favorables à sa propagation et des zones qui sont défavorables. On peut modéliser ce phénomène sur un paysage bidimensionnel (une vue d'avion) constitué d'une mosaïque de zones favorables (des zones où se trouve du combustible, de la végétation essentiellement, cases grises) et de zones défavorables (cases blanches), voir la figure 4. La dynamique du modèle est la

suivante : à chaque pas de temps, le feu (cases noires) qui démarre sur la colonne du bord gauche se propage à toutes les zones favorables contiguës. La zone contiguë peut être définie, par exemple, par les huit cases voisines. La question est de savoir dans quelles conditions le feu va traverser de gauche à droite la mosaïque. Si c'est le cas, on dira que le phénomène a percolé (c'est le cas b).



Dans ce modèle, cela va dépendre de la proportion (densité) de zones favorables au sein de la mosaïque (elle est de  $9/25$  sur a et sur b). Cela peut aussi dépendre de la distribution spatiale des zones favorables dans la mosaïque ou de la taille de cette mosaïque. A chaque densité spatiale de zones favorables va correspondre une probabilité de percoler. Lorsque cette probabilité devient un, on dit que l'on a atteint la « densité critique », ou « seuil de percolation ».

De même que les modèles décrits plus haut, le modèle de la percolation peut donc être simulé sur un réseau régulier, une grille, les zones favorables étant disposés au hasard sur les mailles de la grille et étant connectées entre elles dans un voisinage. Il s'agit d'un modèle de percolation de sites. On peut aussi étudier la percolation de liens qui suppose que ce sont les liens qui sont « conducteurs » ou « isolant » et répartis au hasard sur la grille. Ainsi, il y a de nombreuses versions du modèle de percolation. Par exemple, on peut associer au lien de chaque paire de sites voisins, une valeur aléatoire indépendante et identiquement distribuée. Cette valeur s'interprète comme la durée nécessaire pour que le feu se propage d'une zone à un zone voisine. Différentes quantités peuvent être étudiées en fonction du modèle choisis. En plus de la densité

critique de percolation, on peut déterminer l'évolution du nombre d'arbres vivaces et brûlés, l'évolution du front de l'incendie, la durée de l'incendie ou encore le délai nécessaire à la percolation des zones incendiées d'un bout à l'autre de la forêt.

Je me suis attardée sur la percolation et les incendies de forêt car cet exemple me servira d'illustration privilégiée dans le chapitre suivant.

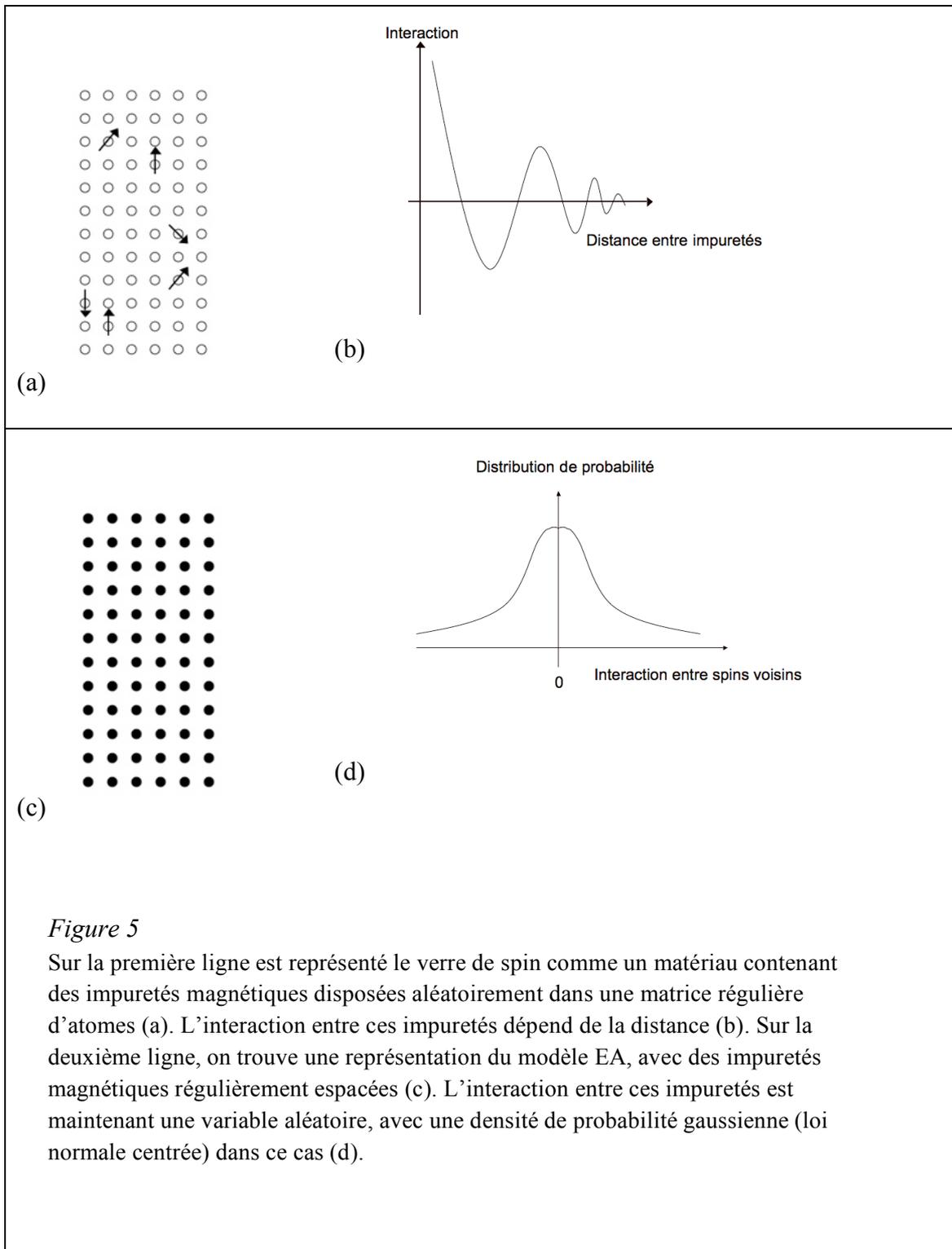
Pour nombre de calculs analytiques sur les modèles de grille, comme pour le verre de spin, les résultats analytiques sont obtenus lorsque la taille linéaire de la grille est infiniment grande par rapport à la taille des constituants élémentaires et que les effets de bords peuvent être négligés. Au contraire, les effets de taille finie deviennent non négligeables dans une situation réelle comme un feu de forêt ou celle que j'ai étudiée dans un modèle de dynamique de populations (Amat et al, à soumettre). Dans cet article, nous utilisons la percolation pour décrire la capacité de dispersion des espèces dans un environnement hétérogène. Nous simulons la dynamique de deux populations en compétition, sur un automate cellulaire (voir section 2.3). L'environnement est décrit par une grille comprenant des zones habitables, où les populations des deux espèces peuvent s'installer, et des zones non-habitable. Lorsque l'on varie le nombre de sites non-habitable, on observe le phénomène de percolation : en faisant varier la densité de sites non-habitable, au voisinage du seuil de percolation, on change brusquement la connectivité de l'environnement. Le point important est que cette connectivité de l'environnement dépend non seulement du processus statique de fragmentation de l'habitat mais aussi du processus dynamique de dispersion de chaque population. En effet, l'environnement est connecté pour une population si ses individus peuvent se mouvoir d'un bout à l'autre de la grille (comme sur la figure 4b), et il devient fragmenté lorsqu'une population est confinée dans des îlots. Or chaque espèce ne perçoit pas la connectivité de l'environnement de la même manière : cela dépend de son échelle de dispersion, c'est-à-dire sa capacité à franchir les distances qui séparent les îlots de zones habitables (Amat et al, à soumettre). Dans le modèle de percolation, cela se traduit par le fait que la densité critique dépend de la taille du voisinage : elle est de 41% de sites pour un voisinage (ou distance de dispersion) de 4 cellules, de 58% pour un voisinage de 8 cellules, etc.

Pour conclure, le modèle de la percolation partage avec les autres modèles présentés ci-dessus les éléments fondamentaux des systèmes désordonnés :

- Il y a un grand nombre de composants qui plus est identiques : les zones, les spins, etc.
- Ces composants sont en interaction, le plus souvent via une propriété spatiale (qui dépend de la distance) et locale (la contiguïté physique des zones, le potentiel entre atomes voisins, etc).
- La structure du système est fortement hétérogène ce qui confère au modèle un caractère aléatoire (distribution aléatoire des positions relatives des composantes ou des interactions).

Ces modèles décrivent, à partir de ces hypothèses, l'apparition d'un phénomène critique (une transition) et font le lien entre le niveau global (les propriétés émergentes au niveau macroscopique) et le niveau local (les interactions entre composants du niveau microscopique). Les trois points ci-dessus sont partagés avec les systèmes complexes, en particulier les modèles d'automates cellulaires (section 2.3), à la différence près que les composants de l'automate cellulaire ne sont plus forcément tous identiques.





*Figure 5*

Sur la première ligne est représenté le verre de spin comme un matériau contenant des impuretés magnétiques disposées aléatoirement dans une matrice régulière d'atomes (a). L'interaction entre ces impuretés dépend de la distance (b). Sur la deuxième ligne, on trouve une représentation du modèle EA, avec des impuretés magnétiques régulièrement espacées (c). L'interaction entre ces impuretés est maintenant une variable aléatoire, avec une densité de probabilité gaussienne (loi normale centrée) dans ce cas (d).

## **Le chaos dans les verres de spin**

Au cours des années où j'ai fait de la recherche en physique (1989-1997), j'ai travaillé sur des matériaux aux propriétés magnétiques particulières, occasionnellement sur les supraconducteurs et principalement sur les verres de spin.

Il existe plusieurs centaines de matériaux reconnus comme étant des verres de spin. Les plus classiquement étudiés sont les matériaux métalliques cristallins où un métal noble (Cuivre, Argent, Or, Platine) est dopé d'ions métalliques magnétiques de Manganèse ou de Fer. Ces impuretés sont dispersées sans ordre particulier, ce qui est une caractéristique que l'on retrouve dans le verre (figure 5).

Les verres de spin possèdent plusieurs propriétés expérimentales remarquables : une transition de phase avec une phase basse température particulière (voir texte), dite phase verre de spin, des effets de vieillissement (ses propriétés à un instant précis dépendent de son âge et de son passé), une relaxation vers l'équilibre extrêmement lente caractéristique des systèmes vitreux.

La phase basse température est particulièrement complexe. Les corrélations spin-spin sont très sensibles à des changements de température (ou de champs magnétique externe) et sont des fonctions qui semblent varier aléatoirement avec la température. Usuellement, les phénomènes chaotiques sont caractérisés par le fait que deux conditions initiales, même extrêmement proches, peuvent provoquer de grands écarts entre deux trajectoires temporelles. Pour le chaos dans les verres de spin, la température fait varier les conditions initiales et l'échelle de longueur joue le rôle de l'échelle de temps.

Pour ma part, j'ai travaillé sur ce phénomène de chaos de façon discontinue entre 1989 et 1997, avec au départ une approche essentiellement mathématique, puis sur la fin en développant des simulations numériques lors d'un séjour à l'Université de Californie, Santa Cruz (Ney-Nifle et Young 1997, Ney-Nifle 1998).



Figure 6

Le nombre d'espèces de plantes que l'on trouve dans des quadrats d'aire croissante est une relation linéaire sur une échelle log-log. Il s'agit d'une mise en évidence de la relation espèce-aire dans le comté Hertfordshire (en haut) (UK). L'exposant de la loi de puissance est ici de 0.192 (en bas).

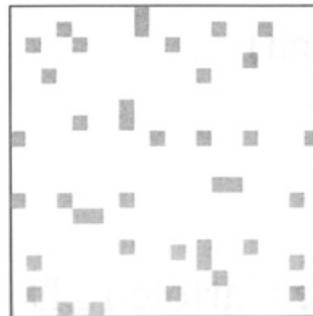
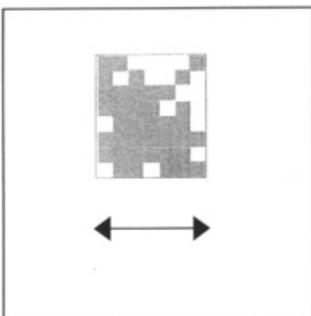
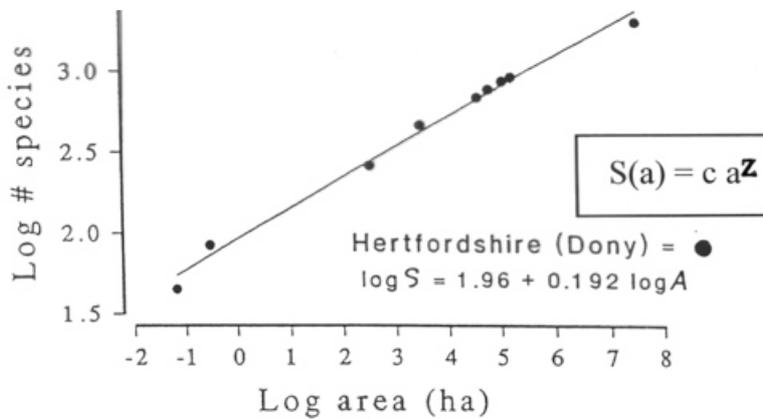


Figure 7

Dans ces simulations, l'extension spatiale de l'espèce représentée (cases grises) est de 30% (à gauche) ou de 100% (à droite) tandis que l'occupation est de 10% dans les deux cas.

## La biodiversité : évaluation de la diversité des espèces et de son érosion

Un problème crucial de l'écologie est celui désigné par le terme *biodiversité* (Lévêque 1997). La diversité des espèces, que recouvre en partie ce terme, pose de nombreuses questions comme celles de la quantification et la valeur de cette diversité, son rôle dans l'écosystème ou encore les mécanismes de son érosion, sous l'action de l'homme, et de sa restauration.

Un outil et aussi un modèle central dans l'étude de la diversité des espèces est la relation entre le nombre d'espèces dans un site et l'aire de ce site, souvent désignée par «loi espèce-aire». Cette relation a été observée sur le terrain de nombreuses fois et sa simplicité la rend très attrayante (souvent une loi de puissance avec un exposant plus petit que un, figure 6). Différents mécanismes ont été proposés pour retrouver cette loi de puissance ou d'autres relations plausibles (MacArthur et Wilson 1967, Coleman 1981, Durrett et Levin 1996, Rosensweig 1997, Harte 1999). Ces auteurs proposent des facteurs déterminants possibles :

- l'échelle spatiale (un réseau d'îles, une région, un pays, un continent),
- la distribution de probabilité du nombre d'individus de chaque espèce en présence,
- le positionnement dans l'espace des individus (aléatoire ou pas),
- la dynamique de dispersion et de recolonisation des îlots ou des régions,
- le rôle de certaines espèces clés dans un écosystème.

La plupart des modèles expliquant la forme de la relation espèce-aire font l'hypothèse que les individus des espèces sont repartis uniformément sur tout le site. Autrement dit, l'hétérogénéité spatiale n'est pas prise en compte. Notre approche au contraire se base sur la connaissance de la distribution spatiale des espèces. Nous montrons que cet élément est essentiel s'il s'agit de prédire le nombre d'espèces perdues lorsque leur habitat se réduit.

En collaboration avec Marc Mangel, j'ai donc développé un modèle permettant de reconstruire la relation espèce-aire à partir d'informations sur la distribution spatiale des espèces : une distribution de probabilité pour l'extension spatiale et une autre pour le degré d'occupation (figure 7). Par des calculs analytiques puis numériques (cf texte - modèle d'Ising - et Ney-Nifle et Mangel 1999), nous dérivons la relation espèce-aire à partir de ces deux distributions.

Ce modèle nous permet ensuite d'illustrer l'intérêt de mesurer ces deux distributions pour déterminer une politique de conservation des espèces (Ney-Nifle et Mangel 2000). En effet, nous avons considéré le problème de l'estimation du nombre d'espèces perdues après réduction de l'habitat. Cette estimation est souvent basée sur une utilisation erronée de la relation espèce-aire. Le problème vient de la différence qu'il peut y avoir entre deux relations, toutes deux dites « relations espèce-aire ». La première est obtenue à partir du nombre d'espèces dans des sites d'aire de plus en plus grande, nombre moyenné sur des sites en différents endroits. La deuxième est obtenue à partir du nombre effectif (et non moyenné) d'espèces dans une aire donnée, croissante, en particulier celle qui va être détruite.

Notre modèle prédit une nouvelle relation <espèces perdues-aire détruite> qui dans certains cas sur-estime et dans d'autres sous-estime le nombre d'espèces perdues, par rapport à l'approche classique. Cela dépend de la géométrie de l'habitat détruit (site isotrope ou pas) et de sa connectivité (site plus ou moins fragmenté). Le modèle rend compte du fait que le taux d'extinction est fortement influencé par la présence d'espèces à extension spatiale limitée, des espèces rares ou endémiques.

## 2. Modélisation en écologie comportementale

« Les premiers hommes étudiaient le comportement animal pour accroître leur propre fitness, les biologistes d'aujourd'hui utilisent la fitness de leur animaux d'étude pour guider leur recherches sur le comportement » (traduction libre de Campbell, 1996, p. 1173).

L'écologie comportementale (Danchin et al 2005) a pour ambition d'expliquer les adaptations du comportement animal dans le contexte écologique, en faisant appel à la théorie de la sélection naturelle. Elle suppose une influence de l'environnement et de la génétique sur les comportements et fait partie, à ce titre, de la biologie évolutive.

L'architecture génétique, le génotype, des individus présente des variations qui peuvent être mises en relation avec leur capacité à survivre et à se reproduire. Selon la théorie darwinienne de l'évolution, la sélection naturelle favorise les organismes qui ont le meilleur succès reproducteur, désigné par 'valeur adaptative' ou 'fitness' et mesurée par le nombre de descendants fertiles, donc capables de se reproduire à leur tour. Cette évolution devient visible lorsqu'il y a une correspondance entre le génotype et certains traits caractéristiques individuels apparents, le phénotype. Ces traits peuvent se diviser en deux catégories, des traits biologiques (physiologiques ou fonctionnels) et des traits comportementaux (les stratégies de récolte de nourriture ou de recherche de partenaires, par exemple). Selon la théorie, le génotype et l'environnement influencent ces traits individuels qui deviennent dominants au fil du temps et finissent par prévaloir dans une population donnée, il y a évolution.

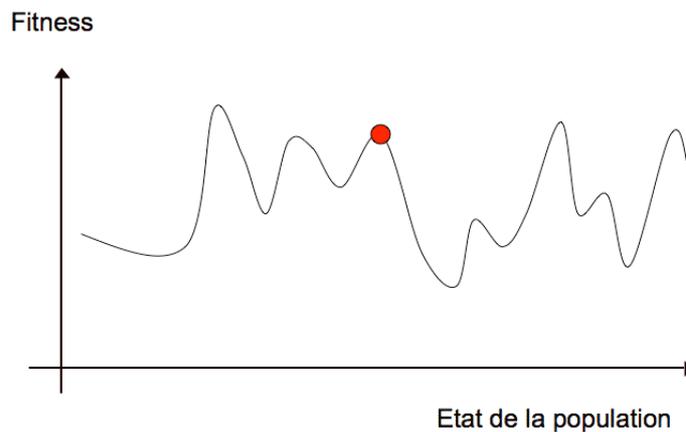
L'écologie comportementale se focalise sur les traits comportementaux et tente d'expliquer pourquoi certaines caractéristiques phénotypiques évoluent dans un environnement écologique donné. Pour aborder ce type de question, plusieurs approches sont utilisées : la génétique des populations et la génétique quantitative (dont nous ne parlerons pas ici), la recherche d'optimum, la recherche de stratégies évolutionnairement stables et aussi l'étude de l'influence du comportement sur la dynamique de population.

Plusieurs modèles consistent à rechercher les stratégies comportementales les plus adaptées en évaluant ce que chaque trait apporte à l'organisme et ce qu'il lui coûte. Ces considérations de coût et de dépense ne sont pas sans rappeler le domaine de l'économie avec lequel l'écologie comportementale partage plusieurs approches (par exemple la théorie des jeux).

## 2.1 Recherche d'optimum

Les stratégies que l'on observe chez les animaux, dans la récolte de nourriture par exemple, ne sont probablement pas les pires qui leur soient possibles. Mais sont-elle les plus adaptées (au sens de la théorie de l'évolution, c'est-à-dire de la maximisation de la fitness) ? Une hypothèse de travail dans l'approche par recherche d'optimum est que les animaux exhibent des comportements optimaux, des stratégies sélectionnées, autrement dit ces stratégies maximisent la fitness. Cette hypothèse soulève un certain nombre de problèmes, entre autres celui de la définition de la fitness dans ce contexte, c'est-à-dire de la mesure du nombre de descendants fertiles à partir des comportements.

Une autre difficulté est que l'hypothèse de l'optimalité est évidemment simplificatrice et ne peut s'appliquer partout. On connaît de nombreux animaux qui ne se comportent pas de manière optimale sans pour autant que cela menace leur fécondité. Pour prendre un exemple cité par R. Chauvin (1985), on sait que des abeilles continuent de préférer aller butiner une espèce de fleurs même après que les ressources en nectar de ces fleurs s'amointrissent. Pourtant, elles pourraient trouver à proximité des ressources plus optimales (ces abeilles n'exhibent donc pas le comportement d'échantillonnage que l'on a pu mettre en évidence chez les bourdons, voir la section 1.3). Une des façons d'aborder à cette difficulté est de considérer que les solutions, les stratégies optimales, ne sont pas toutes accessibles à l'individu, ce que l'on peut comprendre en regardant le paysage adaptatif de Wright (figure 8, Wright, 1982).



*Figure 8*

Une population à la recherche d'un pic de fitness dans le paysage adaptatif. Différents processus génétiques permettent l'exploration de plusieurs de ces pics, extremum locaux.

Cette représentation est similaire, conceptuellement, au paysage énergétique d'un verre de spin vu dans la section précédente (figure 3). Elle permet de comprendre pourquoi optimal ne veut pas dire parfait. En effet, on voit que l'on peut rester bloqué dans un extremum local et ne jamais atteindre la stratégie optimale à cause des barrières. Différents processus empêchent ainsi d'atteindre l'extremum adaptatif. L'optimum résulte de compromis sous contraintes, des contraintes intrinsèques (les variations génétiques possibles, l'anatomie héritée, etc) et des contraintes extrinsèques (l'environnement à un moment donné), ce qui empêche une exploration de toutes les stratégies possibles.

L'approche de l'écologie comportementale par recherche d'optimum consistent donc à rechercher la stratégie la plus « économique possible », celle qui maximise le nombre de descendants fertiles tout en respectant les contraintes extrinsèques et intrinsèques. Malgré la relative naïveté de l'hypothèse de travail et parfois aussi des modèles, ce type d'approche a permis de considérer des questions nouvelles et de mettre à jour des faits expérimentaux, ce qui est un des objectifs de tout nouveau modèle.

Deux familles de modèles ont été abordées dans mes travaux, celle de l'approvisionnement optimal et celle de la programmation dynamique.

Un exemple de modèle d'optimisation est l'approvisionnement optimal (« optimal foraging theory») qui a vu le jour au milieu des années 1960 (Stephens et Krebs, 1986). Cette théorie répond, de manière simple dans sa version initiale, aux problèmes évoqués ci-dessus. C'est une des approches fondatrices de l'écologie comportementale même si elle a ensuite été utilisée aussi en psychologie et en anthropologie.

Le terme anglais « foraging » que l'on voit traduit par récolte, cueillette, affouragement, ou encore approvisionnement, désigne la recherche de « proies » au sens large du terme. Ainsi, la proie n'est pas nécessairement une nourriture, mais représente toute ressource qui peut produire un accroissement de la fitness.

Cette théorie propose d'expliquer les « décisions » de l'animal (on parlera aussi de ses « choix ») concernant le type et la quantité de proies, les zones qu'il exploite et le temps passé à exploiter ces zones. Les modèles de récolte optimale supposent que les décisions prises par l'animal pendant la récolte visent à maximiser ses gains et à minimiser le temps passé à la récolte. Autrement dit, il s'agit d'établir le rapport de l'énergie (gagnée et consommée) sur le temps (Stephens et Krebs, 1986). Cette théorie revendique un point de vue évolutionniste, car si le sujet s'adapte avec succès à une stratégie de récolte sur le long terme, son aptitude à se reproduire (fitness) s'en trouvera théoriquement améliorée. En réalité, ces modèles basés sur des évaluations de coûts (énergie consommée) et d'avantages (énergie gagnée) peuvent être vus, sur le plan opérationnel, comme des moyens d'expliquer et de mesurer empiriquement des choix, sans pour autant faire appel à la sélection naturelle de Darwin.

Les modèles de récolte comportent quatre composantes distinctes :

1. les sujets (les animaux),
2. une série de choix possibles pour le sujet,
3. une "devise" pour mesurer les gains et les pertes,
4. des contraintes intrinsèques et extrinsèques auxquelles le sujet doit faire face.

Dans la plupart des modèles, les choix sont d'un de ces deux types : (1) le choix de la proie ou de la zone à exploiter et/ou (2) le choix du moment où il convient d'abandonner une zone.

Une résolution analytique est en général possible pour ces modèles d'optimisation ce qui en fait aussi l'intérêt. Ainsi, j'ai adapté un tel modèle à un système hôte-parasitoïde<sup>1</sup> (voir l'encadré correspondant). Nous nous intéressons aux stratégies des femelles parasitoïdes, *Mallophora ruficauda*, permettant à leurs propres larves de localiser les hôtes nécessaires à leur développement, les « proies », sachant que ces hôtes sont des larves de scarabées (Coleoptera: scarabaeidae) enfouies dans le sol (Castelo et al 2006). Ceci a donc de particulier que les femelles parasitoïdes n'ont pas la possibilité de localiser les hôtes où leurs larves pourront se développer. Elle pondent des "sacs d'oeufs" et les accrochent aux plantes de la pampa argentine. Ces oeufs vont ensuite se détacher de la plante et être dispersés par le vent avant d'atterrir sur le sol sous forme larvaire. Ils vont pouvoir ensuite s'enfouir dans le sol et peut-être rencontrer des larves-hôtes qui y sont cachées.

Devenu adulte, ce parasitoïde est un prédateur d'abeilles ce qui lui confère une importance économique en Argentine car il menace la production et l'exportation du miel. Marcella Castedo et un de ses directeurs de thèse, Juan Corley (CONICET, Bariloche, Argentine), voulaient trouver des moyens de contrôler le développement de ces parasitoïdes prédateurs. Pour cela, ils avaient entrepris une série d'expériences de terrain et de laboratoire dans le but de mieux comprendre l'interaction entre hôtes et parasitoïdes.

Un aspect de ce projet qui m'a paru particulièrement intéressant de modéliser sont les stratégies de ponte de la femelle parasitoïde dans cet environnement. En collaboration avec Carlos Bernstein et les deux auteurs cités plus haut, j'ai développé un modèle basé sur l'idée que cette stratégie consiste à choisir la bonne plante, plus spécifiquement la bonne hauteur de plante afin de profiter au mieux de la dispersion par le vent et d'augmenter la probabilité de rencontre avec les hôtes. En effet, on peut penser que les oeufs dispersés par le vent vont se distribuer au sol en fonction de la hauteur de la plante de départ. Dans notre modèle, la « proie » (la ressource) du modèle de l'approvisionnement optimal est donc la plante. De plus, maximiser la fitness revient à maximiser le nombre d'hôtes parasités. En effet, dans un système hôte-parasitoïde,

---

<sup>1</sup> L'insecte parasitoïde se développe aux dépens d'un autre insecte, son hôte (œuf, larve ou insecte adulte) et le tue, ce qui le distingue d'un parasite qui lui ne tue pas son hôte.

définir la fitness est relativement aisé puisque toute stratégie de ponte aura une influence directe sur le nombre de descendants.

Passons à une autre approche par optimisation qui, elle, prend explicitement en compte l'état de l'animal. Il s'agit de la « programmation stochastique et dynamique » (Mangel et Clark 1988, Clark et Mangel 2000). Cette méthode d'optimisation séquentielle est basée sur le principe d'optimalité de Bellman. Elle est utilisée en écologie comportementale (mais pas seulement) pour prédire le comportement des individus en fonction de leur état physiologique (âge, état reproductif, réserves métaboliques...). Cet état change au cours du temps de manière probabiliste et itérative, en fonction des comportements adoptés plus tôt par l'animal.

Le principe est le suivant : supposons que l'animal cherche à accumuler un gain maximum au cours d'une récolte et qu'il y a des endroits où la récolte est bonne et d'autres où elle est mauvaise. Qui plus est, les endroits favorables changent de place et les déplacements sont coûteux. L'animal ne peut pas se contenter de continuer à aller à un endroit qui a jadis été favorable. Il doit estimer ses gains présents et ses gains futurs et il doit optimiser les deux. Or le futur est stochastique, c'est une moyenne des futurs possibles à laquelle on a accès. La fonction de Bellman qui doit être optimisée est l'espérance mathématique des gains à une position (on peut remplacer 'position' par 'état physiologique') donnée entre la date d'aujourd'hui et la date limite à laquelle la récolte va cesser (la mort de l'animal par exemple).

Ces modèles nécessitent en général une résolution numérique et donc une programmation. J'ai appliqué cette méthode (Kearse et al. 2000) à la prise de décision pour le choix des hôtes chez les guêpes parasitoïdes du genre *Trichogramma* (voir encadré « interactions hôte-parasitoïde ») en collaborant avec Tamar Kearse (Université Hébraïque de Jérusalem) et Marc Mangel (Université de Californie, Santa Cruz). Nous avons procédé à une série d'expérimentations en laboratoire et, pour interpréter nos résultats, nous avons utilisé un modèle de programmation dynamique. A chaque pas de temps, la décision prise par l'animal dépend de son état. En l'occurrence, la décision est un choix entre rester ou quitter l'agrégat d'hôtes. Dans notre modèle, ce choix dépend de l'apprentissage et donc des expériences passées ainsi que du souvenir de ces expériences (effet de mémoire). Une fois encore, la fitness d'un individu est directement reliée au nombre d'hôtes parasités qui est corrélé avec le nombre de descendants.

## 2.2 Recherche d'ESS

La théorie des jeux est un autre exemple de modèle basé sur une optimisation de la fitness et qui a une utilisation bien plus large que celle de l'écologie comportementale. La théorie des jeux modélise des situations dans lesquelles plusieurs individus, des « joueurs », interagissent et prennent des décisions. Leurs actions sont conditionnées par

ces décisions et ces actions ont des effets sur les gains (ou pertes), ceux des uns affectant ceux des autres (en biologie, on parle de fréquence dépendance).

Dans le cadre de l'écologie comportementale, la théorie des jeux permet d'étudier les comportements individuels et les interactions entre comportements dans des situations de choix, ces situations pouvant par exemple créer la compétition ou la coopération entre individus (Maynard Smith 1982). Dans un jeu, ces individus sont à la recherche de la stratégie qui maximise leur fitness. Cette stratégie peut être constante et déterminée comme elle peut être probabiliste. Dans une stratégie mixte, par exemple, le joueur choisit entre plusieurs possibilités, avec une certaine distribution de probabilité. En écologie comportementale, on parle donc de situation de « jeu » parce que la fitness de chaque joueur dépend évidemment de la stratégie qu'il choisit mais aussi de celles qui sont choisies par les autres « joueurs ». Cette fréquence dépendance est précisément ce qui distingue ce type de modèle du modèle d'optimisation de l'approvisionnement optimal (section 2.1).

Un jeu se caractérise par des règles qui définissent trois composantes essentielles de tout jeu :

- le nombre de joueurs (au moins deux) et l'ordre d'intervention des joueurs : une liste de  $n$  joueurs, chacun étant caractérisé par un indice  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$ .
- les types d'actions, « stratégies » ou « choix », possibles des joueurs : un ensemble  $\{S_1, \dots, S_n\}$ , où  $S_i$  est l'ensemble des stratégies du joueur  $i$ , dont il choisit un élément  $s_i$  de façon à maximiser sa fitness.
- les rétributions (gains, pertes) et les résultats : un ensemble de fonctions de gain,  $\{f_1, \dots, f_n\}$ , la fonction  $f_i(s_1, \dots, s_n)$  étant la fitness du joueur  $i$  lorsque les choix des joueurs sont donnés par la liste - ou le vecteur - de stratégies  $(s_1, \dots, s_n)$ .

Certaines règles peuvent s'ajouter à cette liste sur différents points.

- Les informations complètes ou partielles sur les stratégies possibles pour soi et les autres participants, ainsi que sur les résultats possibles.
- Les informations parfaites ou imparfaites à un moment du jeu sur les décisions prises par les autres joueurs, antérieurement et le degré de communication entre joueurs (e.g. collusion ou non).
- Le déroulement et les étapes du jeu.
- La répétition ou non du jeu.

Dans le cas du jeu synchrone, une solution finale du jeu est une liste de stratégies et elle résulte d'un choix simultané d'une stratégie par chacun des joueurs - ceux-ci prenant leur (unique) décision en ignorant celles des autres. Même dans le cas où chaque joueur a une information complète sur les autres, il ne peut pas, en règle générale, prévoir avec certitude leurs choix (information imparfaite).

Une alternative à ce jeu unique est le jeu répété. La répétition d'un jeu, avec connaissance des résultats intermédiaires, change souvent fondamentalement son déroulement. Par exemple, il peut être utile de prendre ponctuellement le risque de perdre « pour voir », tester les autres joueurs, et mettre en place des stratégies de communication par les coups joués. Les applications des jeux répétés, avec par exemple le cas du jeu du dilemme du prisonnier répété, ont intéressé les biologistes depuis le début des années 1980. Quand on répète un jeu durablement dans une population, certains comportements intéressants peuvent apparaître. Par exemple, les individus qui adoptent une stratégie « intéressée » peuvent perdre à long terme, alors que les individus apparemment plus désintéressés voient leur « altruisme » finalement récompensé.

On appelle « équilibre » un état dans lequel aucun joueur ne souhaite modifier son comportement, quel que soit le comportement des autres joueurs. Une fois qu'un équilibre a été atteint -peu importe le processus par lequel il a été obtenu- il n'y a aucune raison de le quitter. L'« équilibre de Nash » est un autre concept fondamental en théorie des jeux : c'est, pour un joueur, la meilleure stratégie possible étant donnée les stratégies des autres joueurs. Le terme « équilibre » suggère que l'on étudie un processus dont l'équilibre serait l'aboutissement, or ce n'est pas le cas et certains auteurs font plutôt référence à la « solution de Nash ». L'équilibre de Nash est donc relatif puisqu'il dépend des stratégies des autres (tandis qu'un équilibre simple ne tient pas compte des stratégies adverses). Selon B. Guerrien (1995), la meilleure façon de caractériser l'équilibre de Nash consiste à voir en lui une situation de non-regret : il y a équilibre de Nash si aucun joueur n'a à regretter le choix qu'il a effectué, après avoir constaté celui des autres.

Les biologistes ont défini une forme plus exigeante d'équilibre : une stratégie évolutionnairement stable ou ESS (Evolutionary Stable Strategy) qui reste stable même en cas de comportement légèrement perturbé (Maynard Smith 1982). Cette stabilité vise à couvrir les situations d'apparition de nouveaux comportements dans une population, c'est-à-dire de dépasser l'équilibre selon Nash.

Mon premier travail sur la théorie de jeux a porté sur une question posée par Jacques van Alphen (Université de Leiden) : pourquoi, pour la plupart des espèces, les parasitoïdes préfèrent-ils partager un agrégat d'hôtes plutôt que d'en chasser les compétiteurs ? C'était une question ouverte et très rarement posée dans la littérature qui se centrait plus souvent sur la compétition et plus rarement sur les phénomènes de coopération, à l'époque (Calbert 1999). Au laboratoire de J. van Alphen on observait trois types de stratégie lorsque des individus (de différentes espèces de parasitoïdes) se trouvaient en interaction : le combat, l'évitement, et la stratégie la plus commune, le superparasitisme (parasiter un hôte déjà parasité, Visser 1992). La question est de savoir si l'on peut prédire la stratégie optimale (parmi les trois mentionnées) en fonction de l'environnement, en supposant que cet environnement peut induire une pression sélective sur le type de comportement. En effet, les distributions spatiale et temporelle

### Une illustration : le jeu faucon-colombe

Ce jeu est un des exemples classiques utilisé en écologie. Il modélise un conflit opposant des individus pour l'obtention d'une ressource (de la nourriture, un partenaire pour la reproduction, etc). Dans la version de base du jeu, les individus s'affrontent deux à deux de manière synchrone en ayant une information complète sur les deux stratégies possibles et les trois résultats possibles.

Il y a donc deux stratégies possibles.

- (1) La stratégie Colombe :  
l'individu refuse le conflit et s'enfuit dès qu'il est agressé.
- (2) La stratégie Faucon :  
l'individu agresse son compétiteur pour la ressource.

Il y a trois cas possibles avec les résultats suivants :

*Deux colombes se rencontrent*

→ la première arrivée remporte le gain, sans conflit.

*Une colombe rencontre un faucon*

→ le faucon gagne systématiquement, sans conflit.

*Deux faucons se rencontrent*

→ il y a un conflit, et chaque compétiteur a une chance sur deux de gagner la ressource, mais aussi de perdre et de subir des dégâts.

Le gain est la valeur, en terme de fitness (nombre de descendants), de la ressource. Les dégâts dus au combat entraînent une diminution de ce gain et donc un coût.

Par des calculs simples, on peut montrer qu'à l'équilibre les deux stratégies peuvent coexister au sein d'une population, dans des proportions qui dépendront des valeurs du gain et des coûts.

On peut montrer aussi que si une stratégie mutante, dite "bourgeoise", apparaît, et qui consiste à refuser le conflit en présence de faucon, mais à toujours combattre contre une colombe, alors cette stratégie envahira, elle s'étendra à tous les individus de la population. C'est une ESS.

de ces agrégats diffèrent d'un environnement à l'autre et des populations de parasitoïdes génétiquement proches évoluent donc dans des environnements très différents. Tout le problème consiste à identifier et formaliser les coûts et les bénéfices de chaque stratégie en fonction de paramètres décrivant l'environnement (telles que la distance moyenne entre deux agrégats d'hôtes, la densité des hôtes en fonction du temps...). J'ai élaboré un modèle préliminaire basé sur un jeu où l'on suppose que le coût de la confrontation de deux individus pour l'attribution d'un agrégat est un coût de temps et non de préjudice physique (Ney-Nifle 2001). Il est traité de manière classique par le biais d'une représentation matricielle (un tableau) des gains possibles en fonction des stratégies.

C'est lors d'une autre collaboration que j'ai pu aller plus loin sur les approches par recherche d'ESS (Ney-Nifle et al, à soumettre). Avec Irène Till-Bottraud (Université J. Fourier, Grenoble), nous étudions l'interaction plante-pollinisateur du point de vue des

plantes, c'est-à-dire, en termes généraux, l'influence du comportement des pollinisateurs sur le succès reproducteur des plantes (voir encadré pour une description de la problématique biologique). Notre modèle permet de calculer analytiquement les fitness male et femelle d'une plante en fonction de différents paramètres : soit liés à la plante (la disposition des plantes dans l'espace et la dispositions des fleurs sur une plante ainsi que la dépression de consanguinité), soit liés au comportement des pollinisateurs et à leur nombre. La sensibilité des résultats (les ESS) aux variations de valeurs des paramètres est étudiée en utilisant la méthode du « Latin Hypercube Square » (voir références dans Ney-Nifle et al, à soumettre). Celle-ci permet une analyse multi-paramètres, par opposition à une analyse classique mais souvent erronée qui consisterait à faire varier un paramètre à la fois. Le principe de base de cette méthode est de sélectionner, de manière stratifiée, des échantillons de valeurs de paramètres dans l'intervalle qui définit chacun d'eux. Ceci permet d'obtenir des résultats sur la base d'un nombre raisonnable d'échantillons, là où considérer l'ensemble des combinaisons possibles de valeurs de paramètres est exclus (comme dans notre cas où il y a 6 paramètres prenant des valeurs continues). Le modèle est analysé dans le cadre de la dynamique adaptative.

La dynamique adaptative est une extension de la théorie des jeux à la dynamique des populations (voir Geritz et al 1997 et aussi Dieckman 1999 pour un exemple démonstratif). Le principe de base est le suivant : au sein d'une grande population monomorphe (une seule variante du trait étudié, ou « stratégie résidente »), on fait apparaître un mutant de phénotype proche. En faisant un certain nombre d'hypothèses et en se basant sur le cycle de vie de l'espèce étudiée, on peut calculer la capacité d'un mutant à envahir la population de résidents. On a alors trois cas possibles : la stratégie résidente gagne ou la stratégie mutante envahit, ou bien encore les stratégies résidente et mutante coexistent. Il s'agit ainsi de calculer quelle(s) stratégie(s) seront présentes à long terme. Pour cela, on détermine une « fonction invasion » (voir par exemple l'article sur les parasites de nichée, Ney-Nifle et al 2005) qui est le taux de croissance exponentielle du mutant dans la population résidente.

Cette approche se base sur un certain nombre d'hypothèses.

- Reproduction clonale : un individu donne naissance à des individus de même stratégie.
- Mutations faibles : mutant et résident se ressemblent.
- Mutations rares : un mutant à la fois.
- Résident à l'équilibre démographique.
- Effectif initial du mutant négligeable devant celui du résident.
- Equilibre écologique atteint rapidement (instantanément) par rapport au temps évolutif.

Plusieurs méthodes sont possibles pour déterminer les stratégies à long terme, certaines analytiques, d'autres ayant une base graphique comme le paysage adaptatif ou le diagramme d'invasion (« pair-wise invasion plot ») que j'ai utilisé (Ney-Nifle et al, à soumettre).

On a pu ainsi lier la notion d'ESS à la dynamique de population et plus précisément à la notion d'invasion : une stratégie est évolutionnairement stable s'il n'existe pas de stratégie mutante qui puisse envahir une population résidente.

### 2.3 Dynamique de populations

L'écologie comportementale s'intéresse à plusieurs titres aux populations, en particulier au rôle des comportements individuels dans le fonctionnement et le devenir des populations ou des communautés de populations. Le principe de base est que les populations sont liées dynamiquement par des phénomènes de compétition, de dispersion, de prédation, etc, et donc par les comportements qui entrent en jeu dans ces phénomènes. Il s'agit d'expliquer comment ces populations arrivent à se stabiliser et à persister malgré tous ces phénomènes qui tendent, à première vue, à les déstabiliser ou les détruirent (voir les travaux de R. May, par exemple May 1974).

Le modèle de dynamique de population se construit en général en lien étroit avec les données expérimentales. En effet, elles fournissent des estimations des taux vitaux à partir de l'étude du cycle de vie des espèces impliquées, mais aussi des évidences de fréquence dépendance. L'intégration de ces données dans les modèles traditionnels de dynamique de populations et l'analyse des systèmes dynamiques correspondant a pour but de déterminer le pouvoir stabilisateur des processus liés au cycle de vie ou à la fréquence dépendance. Ici s'ajoutent les comportements des entités (individus ou sous-populations) qui constituent chaque population et qui introduisent de nouveaux paramètres.

Plusieurs approches de la dynamique de populations ont été utilisées en écologie comportementale, parmi elles, la résolution de systèmes d'équations dynamiques, la simulation sur automate cellulaire, les modèles compartimentaux (Legay, 1973).

J'ai étudié un système de type hôte-parasite chez des oiseaux. Les Vachers sont des oiseaux parasites de nichée<sup>2</sup> originaires d'Amérique du sud où l'on en dénombre cinq espèces (Winfree 1999). Ces parasites sont majoritairement des utilisateurs généralistes de leur hôtes, chaque femelle pouvant pondre dans des nids d'un grand nombre d'espèces différentes (jusqu'à plus de 200 espèces d'hôtes). Être un parasite généraliste présente l'avantage de ne pas lier son succès reproducteur à celui de la population d'un

---

<sup>2</sup> Un parasite de nichée va, pour assurer sa descendance, coloniser le nid d'autres espèces. Ces hôtes involontaires vont alors se retrouver à nourrir cet oiseau parasite. Il est souvent plus affamé que les siens, voir le seul à nourrir si la femelle parasite a éjecté tous les autres œufs du nid avant de pondre, comme c'est souvent le cas chez les coucous en Europe.

hôte particulier. Étonnamment, il existe aussi des espèces qui se spécialisent sur un petit nombre d'hôtes.

En collaboration avec Juan Rebores (Université de Buenos Aires), Carlos Bernstein et Alex Kacelnik (Université d'Oxford), j'ai développé un modèle autour de la question suivante: quels sont les avantages adaptatifs à la spécialisation chez les vachers ? Notre système comprend trois espèces de vachers, l'hôte, le parasite spécialiste de cet hôte et le parasite généraliste (Ney-Nifle et al 2005). Il est étudié sur le terrain depuis plusieurs années par Juan Rebores, en Argentine. Notre modèle de dynamique des trois populations est conçu pour formaliser et tester l'hypothèse que l'évolution vers la spécialisation résulte de l'évitement de la compétition interspécifique. Cette compétition intervient à deux niveaux : par la perforation des œufs concurrents des siens, et par la limitation du nombre total d'œufs qu'un hôte va tolérer dans son nid (avant de l'abandonner). Nous avons aussi étudié les conditions d'invasion (voir section 2.2) d'un mutant spécialiste, ou généraliste, dans une population adoptant l'autre stratégie. Ce modèle est formellement et conceptuellement très proche des modèles de dynamique de population hôte-parasitoïde chez les insectes (voir encadré correspondant).

Les modèles de dynamique de population permettent aussi de traiter des effets stochastiques de perturbation temporelle ou de structuration spatiale et leur rôle stabilisateur. En collaboration avec Carlos Bernstein et Isabelle Amat (en thèse à l'époque), j'ai abordé ce type de question dans un système hôte-parasitoïde (déjà mentionné dans la section sur la percolation). Nous avons étudié l'impact de la dispersion dans l'environnement et de l'hétérogénéité spatiale et stochastique de cet environnement, sur la dynamique de deux populations en interaction, deux parasitoïdes en compétition pour les hôtes. Ces deux parasitoïdes ont la particularité d'être très proches dans le sens où ils ne diffèrent, en apparence, que par leur mode de reproduction, l'un séxué et l'autre asexué (Amat et al, à soumettre et encadré). Une des deux populations ne comporte donc que des femelles. Nous avons utilisé un automate cellulaire, une approche qui nous a permis de modéliser les deux populations organisées en sous-populations (localisées dans des zones) structurées spatialement et en interaction (dispersion, compétition).

Ceci nous amène à une autre approche de dynamique de populations en interaction dans un environnement spatialement structuré, à savoir les automates cellulaires. La recherche des densités d'équilibre des populations se fait grâce à un algorithme, basé sur des règles locales, qui est itéré jusqu'à obtention d'un état stable (s'il y en a un). Notons cependant que dans le contexte de l'écologie comportementale, il ne s'agit pas toujours de chercher un équilibre où les densités de population se stabilisent à des valeurs constantes mais plutôt un état dynamique pouvant fluctuer autour d'une moyenne et se maintenant ainsi sur des temps évolutifs (donc très long par rapport à la durée de vie des individus).

Un automate cellulaire (AC) possède des éléments qui caractérisent sa dynamique et sa structure topologique.

La dynamique est basée sur :

- un temps discret
- des états discrets (2 états ou plus)
- des règles de transition entre états (règles déterministes ou stochastiques)

L'environnement est structuré par un réseau dont la topologie est déterminée par :

- un espace discret, le plus souvent une grille (1D, 2D...) de cellules de forme arbitraires (carrée, hexagonale, etc)
- un voisinage (de taille arbitraire : proche voisin, second voisin, etc)
- des conditions de bord (périodiques, réfléchissantes, etc)

Un processus spatial se modélise classiquement par des formules mathématiques, déterministes ou probabilistes, et se traduit par la résolution de systèmes d'équations différentielles ou aux dérivées partielles. Or un système d'équations ne se prête pas toujours à une formalisation informatique, un algorithme, car il faut que les phénomènes en cause possèdent suffisamment de « bonnes » propriétés quantitatives, de continuité, de mesurabilité, de stabilité, etc. L'AC qui n'est pas basé sur des équations contourne ce problème. Il est construit à partir de connaissances empiriques qui s'expriment, souvent verbalement, comme des règles. Ces règles modélisent directement les actions des entités élémentaires (les individus, par exemple) occupant chaque cellule et se mouvant d'une cellule à l'autre.

Le processus dynamique est décrit par la succession des états, chaque état global de la grille étant déterminé, à chaque instant, à partir de l'état global à l'instant précédent. Cette opération peut se faire de manière synchrone ou asynchrone, selon que toutes les cellules changent d'état en même temps ou non. En fin de compte, on explique le fonctionnement global (de la communauté de populations en interactions dans notre cas, Amat et al, à soumettre) à partir des mécanismes élémentaires au niveau local, c'est-à-dire au niveau des cellules (des sous-populations dans notre cas). Ceci rejoint ce qui a été dit plus haut à propos des systèmes désordonnés (voir section 1.5). Il s'agit d'un courant de pensée initié au milieu du 20<sup>ième</sup> siècle, qu'on appelle parfois le « computationnisme » (Varenne, 2005 et chapitre 2). Ce courant intègre les idées de la théorie des automates et des langages formels et va bien au-delà de l'écologie comportementale, touchant à la complexité, l'automatique, l'information, etc.



*Figure 10*

La femelle parasitoïde *Venturia canescens* (une guêpe) est en train de pondre un œuf avec son ovipositeur (« stylet » situé au bout de son abdomen). L'hôte est une larve d'*Ephestia kuehniella* (un papillon de nuit).



*Figure 11*

Un œuf de vacher, parasite de nichée, déposé dans le nid d'une femelle d'une autre espèce.

## Les interactions hôtes-parasitoïdes

Le centre d'agroécologie de l'université de Californie, Santa Cruz (UCSC) auprès duquel j'ai vécu durant trois années, possède une ferme, des cultures expérimentales, des élevages d'insectes et des programmes de formation pour les étudiants et d'éducation pour le grand public. Une de ses missions est de développer des méthodes d'agriculture dites biologique (ou « organic » en anglais) qui sont mises au point à la ferme expérimentale et appliquées avec les agriculteurs de la région. Un des sujets de recherche et d'application est le contrôle biologique. Utiliser les ennemis naturels (prédateurs ou parasitoïdes) des insectes qui ravagent les cultures est le but de ce contrôle biologique. Le parasitoïde se développe au dépend de son hôte, l'insecte ravageur des cultures, et le tue. L'écologie comportementale offre une des approches possibles pour améliorer l'efficacité des agents de contrôle que sont les parasitoïdes et comprendre la relation qu'ils entretiennent avec leurs hôtes.

Dans le contexte du contrôle biologique, la question que nous nous sommes posée était la suivante (Keasar et al 2000 et 2001) : peut-on faire suivre un apprentissage aux parasitoïdes afin d'améliorer l'efficacité de leur rôle d'agents dans le contrôle biologique des ravageurs ? Le parasitoïde *Trichogramma thalense*, et son hôte, *Ephestia kuhniella*, sont élevés au centre d'agroécologie de UCSC ce qui nous a permis de tester en laboratoire si ces insectes parasitoïdes étaient capables d'apprendre à associer une couleur à la localisation de l'hôte (Bernstein et al 1988, Turlings et al 1993) et dans quelle mesure cet apprentissage était corrélé avec la qualité des hôtes. Un autre exemple d'étude à laquelle j'ai participé à propos des stratégies de localisation de l'hôte par des femelles parasitoïdes, est celle sur *Mallophora ruficauda* décrite dans le texte (Castello et al 2006).

Le parasitoïde tue son hôte à partir du moment où il n'en a plus besoin pour sa survie. Il y a donc une relation unique entre hôte et parasitoïde qui n'est ni de la prédation ni de la symbiose mais en partage certains aspects. Une question immédiate est de savoir comment ces deux populations se régulent afin de persister sur le long terme, et en particulier comment les comportements influencent cette régulation. Le système hôte-parasitoïdes sert, depuis de nombreuses années, de modèle pour ce type d'interaction (Godfray 1994) et il a permis, à ce titre, de tester plusieurs théories de l'écologie comportementale. Le parasitoïde *Venturia canescens* sert de modèle au modèle dans le sens où c'est une espèce modèle (comme peut l'être la souris) qui a l'avantage de pouvoir être élevée en laboratoire, comme le fait l'équipe de Carlos Bernstein à Lyon 1. Cette espèce est présente en France ce qui permet un terrain d'expérimentation en conditions écologiques pour cette équipe. Récemment, on a pu mettre en évidence la coexistence en condition sympatrique des deux modes de reproduction chez *Venturia canescens* : le mode sexué par arrhénotoquie, classique chez les hyménoptères, et le mode asexué par thélytoquie (c'est une forme de parthénogénèse qui permet de produire des femelles diploïdes sans avoir recours à la fécondation). C'est donc un modèle biologique particulièrement adapté à l'étude du maintien de la reproduction sexuée, une thématique qui fait l'objet de plusieurs thèses sous la direction de Carlos Bernstein. J'ai travaillé, avec Isabelle Amat, sur le rôle de la compétition et de la dispersion dans le maintien du sexe (voir texte et Amat et al, à soumettre). Un autre exemple de dynamique de trois populations, un hôte et deux espèces de parasitoïdes proches, que j'ai pu étudier est celui des oiseaux parasites, les vachers, décrit dans le texte (Ney-Nifle et al 2005).



*Figure 12*

Ce *Bombus terrestris* (un bourdon) a été attiré par une fleur artificielle mauve et butine son nectar (Dyer et al 2006). Un tel dispositif permet de contrôler la température, la concentration et la quantité de nectar ainsi que la taille et la couleur de la fleur.



*Figure 13*

*L'Asclepias incarnata* (herbe à ouate) possède plusieurs inflorescences appartenant à une même plante. La taille et le nombre de ces inflorescences peuvent être manipulés expérimentalement (Fishbein et Venable 1996).

## Les interactions plantes-pollinisateurs

Le « beehave lab » est un laboratoire créé pour l'étude du comportement (approvisionnement, apprentissage, ...) des pollinisateurs, principalement des bourdons. Les bourdons ont en effet un rôle clé pour certaines cultures (comme celle des tomates). Au laboratoire, les insectes peuvent s'alimenter en nectar sur des fleurs artificielles : jusqu'à 48 fleurs dont on contrôle l'approvisionnement au court du temps en nectar, la taille et la couleur ; le passage du bourdon sur une fleur est enregistré automatiquement. Le laboratoire se trouve à l'université hébraïque de Jérusalem et a été mis en place par Avi Shmida mais aussi Tamar Keasar avec qui j'ai pu travailler lors de son séjour à l'Université de Californie, Santa Cruz. Nous avons analysé des données issues d'expérimentation faites au beehave lab et pour cela nous avons, entre autre, utilisé un réseau de neurones (voir section 1.3 et Ney-Nifle et Keasar 1998).

L'interaction plante-pollinisateur peut souvent être qualifiée de mutualiste car elle est à double sens, chacun ayant besoin de l'autre. Le comportement du pollinisateur a un impact important du point de vue de la plante qui n'est pas envisagé au beehave lab puisqu'il s'agit de fleurs artificielles. Les plantes qui utilisent des insectes pour transporter le pollen et se reproduire développent souvent des caractères attractifs pour ces animaux. Par exemple, une plante qui présente une inflorescence de grande taille (un amas comprenant un grand nombre de fleurs) colorée, odorante et nourrissante a plus de chance de les attirer et donc de se reproduire. En revanche, les insectes passant de fleur en fleur sur une même inflorescence favorisent l'autogamie ce qui est défavorable en cas de dépression de consanguinité. La plante est donc ici soumise à des pressions de sélection divergentes sur un même caractère et son adaptation aux pollinisateurs dépend de nombreux paramètres.

Quelles sont les conditions de cette adaptation ? Pour répondre, il faut comprendre les points de vue du pollinisateur et celui de la plante. L'« intérêt » des pollinisateurs est de visiter des fleurs proches et productives, pour maximiser leur gain en nectar par unité de temps. Cependant, à partir d'une certaine densité en pollinisateurs, ces derniers devront se partager les ressources. La théorie de la distribution idéale libre (Fretwell et Lucas 1970, Tregenza 1994) prédit qu'il y aura plus de pollinisateurs sur une plante produisant beaucoup de fleurs (une grande inflorescence). Du point de vue des plantes, il faut rappeler que lorsqu'une fleur est fécondée par du pollen venant d'une autre fleur d'une même inflorescence, par geitonogamie (de Jong et al 1993), cela peut entraîner une réduction de la valeur sélective de l'individu par la fonction mâle (Harder et Barrett 1996). Or une plante présentant beaucoup de fleurs sur une même inflorescence s'expose d'avantage à la geitonogamie puisqu'un pollinisateur a plus de chances de faire des visites successives aux fleurs d'une même plante (Skogsmyr et Lankinen 2002).

En collaboration avec Irène Till-Bottraud, j'ai bâti un modèle (évoqué dans le texte) pour étudier les conséquences d'un compromis entre le nombre d'inflorescences et la taille des inflorescences (à nombre total de fleurs constant). Quel est le résultat de l'adaptation des plantes au comportement des pollinisateurs : une plante avec peu d'inflorescences contenant chacune de nombreuses fleurs, ou des fleurs éparpillées sur beaucoup d'inflorescences, ou tout autre combinaison intermédiaire (Ney-Nifle et al, à soumettre) ?

### **3. Des problématiques de la modélisation en sciences expérimentales**

De mon expérience de plus de quinze années de la modélisation, en physique statistique puis en écologie comportementale, je tire trois problématiques transversales qui me semblent cruciales : le rapport expérience/modèle, l'intervention de l'aléa et la transdisciplinarité. Les questions que j'énoncerai sur ces trois problématiques n'épuisent évidemment pas toutes les questions posées par la modélisation (on pourra par exemple citer la question de la problématisation et du problème, e.g. Orange, 2005). Ces problématiques, révélées dans le cadre d'une activité de chercheur, peuvent être transposées dans le contexte de l'enseignement comme problématiques de la transmission.

Précisons que nous ne parlons que des modèles formels, c'est-à-dire le sous-ensemble des modèles faisant appel aux outils mathématiques, statistiques ou informatiques.

#### **3.1 Le rapport expérience-modèle**

Il y a deux façons de faire de la modélisation (communication personnelle, D. Chessel) : les modèles sont asservis aux données (data-driven) ou les données sont asservies aux modèles (model-driven). Le premier point de vue sera plus souvent pris par l'expérimentateur tandis que le modélisateur tendra plutôt vers le second. Voici un rapide tour d'horizon des modèles présentés dans ce chapitre, en fonction de leur place sur une ligne qui joint ces deux extrêmes. On entendra par « donnée » le résultat d'une expérience, ces données pouvant être intégrées à des degrés divers dans une démarche de modélisation.

Ceci n'a pas pour but de construire une catégorisation mais simplement de situer des travaux de modélisation. La ligne verticale est en fait un continuum et j'ai surtout cherché à placer mes travaux les uns par rapport aux autres, sur cette échelle. Faire cet exercice montre la diversité des rôles que peuvent jouer l'expérience et les données dans la démarche de modélisation. Cette démarche peut ainsi se définir par son lien avec l'expérience ce qui soulève des questions sur la place du modèle dans la démarche expérimentale, la place de l'expérience dans la démarche de modélisation et, finalement, la nature du rapport entre expérience et modèle.

## Data-driven

### L'analyse de données :

Analyser des données expérimentales sans modélisation mathématique autre que les outils et modèles statistiques. Un exemple est l'expérience MathSV présentée au chapitre 3, section 2 (Macedo et al 2005).

### Les données de l'expérience sont le point de départ de la modélisation :

Dans mes travaux sur les parasitoïdes et sur les bourdons, nous sommes partis d'un problème posé par un expérimentateur et de ses données. On modélise au plus près de cette situation particulière pour en reproduire les traits principaux et pour proposer des mécanismes comme explication des données. La difficulté principale dans cette approche est de choisir le modèle le plus approprié.

### Des allers-retours entre le modèle et l'expérience :

Le modèle n'est pas motivé uniquement par une expérience déjà réalisée, mais toutefois des données alimentent le processus de modélisation à plusieurs moments, au départ, pour choisir les paramètres et les hypothèses pertinentes et à la fin pour restreindre l'espace des résultats et proposer de nouvelles expériences en fonction des nouvelles questions posées par les résultats issus du modèle. Il y a aller-retour régulier entre expérience et modèle. C'est le cas du travail sur la dynamique de populations des parasites de nichée (vacher, Ney et al, 2005) et des parasitoïdes (Venturia, Amat et al, à soumettre).

### Le modèle s'inspire de l'expérience :

Les travaux sur la biodiversité (encadré et Ney et Mangel 2001), et celui sur la geitonogamie (encadré et Ney et al à soumettre) sont inspirés par une problématique issue de constats expérimentaux généraux (e.g. une relation espèce-aire en loi de puissance) et non d'un système donné. On s'oriente alors vers un modèle général que l'on peut spécialiser à un système particulier, mais seulement dans un deuxième temps. Le modèle permet avant tout de se poser de nouvelles questions, d'envisager de nouvelles hypothèses.

### Le modèle est relativement déconnecté de l'expérience :

Prenons l'exemple des travaux qui ont trait aux verres de spin, dont l'objectif est par exemple de montrer analytiquement que le modèle EA a une transition de phase et en étudier ses propriétés. Il y a des matériaux qui ont des transitions de phase verre de spin, mais la modélisation ne repose pas sur des données. Il s'agit essentiellement d'inventer de nouveaux modèles ou de trouver de nouvelles solutions (la résolution mathématique des équations du modèle EA, par exemple).

## Model-driven

Cette dernière question sera abordée au chapitre 2, plus particulièrement dans le cadre de l'enseignement. Une typologie des fonctions des modèles sera construite à partir d'un cadre théorique permettant de définir le rapport entre modèle et expérience. Nous partirons de l'hypothèse qu'il existe un lien entre la manière dont on modélise en tant qu'expert ou chercheur et la manière dont on apprend à modéliser en tant qu'étudiant et que ce lien repose sur ce rapport. La typologie sera illustrée par des modèles formels de biologie.

### **3.2 L'intervention de l'aléa**

L'aléa sous ses différentes formes, le hasard, l'incertitude, le désordre, est une donnée fondamentale de la plupart des modèles décrits dans les sections précédentes.

L'approche probabiliste fait partie de la physique, depuis longtemps, entre autres parce que les positions et les déplacements de particules ou de molécules peuvent être aléatoires. Ainsi, des facteurs non déterminés et plus ou moins contrôlés doivent être pris en compte. La physique statistique repose sur une approche probabiliste comme son nom l'indique. Plus haut, nous avons défini les systèmes désordonnés qui sont basés sur l'idée que certaines variables lentes et hétérogènes sont modélisées par des variables aléatoires avec des distributions fixées. On pourrait aussi citer la physique quantique, pour prendre un autre exemple de théorie physique probabiliste, qui est intrinsèquement une forme nouvelle de théorie des probabilités.

En biologie, l'intervention des statistiques est liée à la variabilité du monde vivant, qui diffère de nombreux systèmes physiques par son imprévisibilité voire sa non reproductibilité et son irréversibilité dans le temps. La statistique descriptive fournit une représentation de la diversité du vivant. La statistique inférentielle permet de quantifier l'incertitude, de calculer la probabilité d'erreur associée à l'acceptation ou au rejet d'une hypothèse. On a pu aussi voir, dans la section précédente, l'utilisation des approches probabilistes en écologie comportementale, avec la dynamique de population sur automate cellulaire stochastique.

Ceci pose le problème de la nature des différentes interventions de l'aléa dans la modélisation en sciences expérimentales (de la variabilité du vivant aux incertitudes de mesures physiques). Cette problématique sera abordée au chapitre 3 (section 2).

### **3.3 La transdisciplinarité**

Les travaux décrits dans ce chapitre sont inscrits dans deux disciplines, la physique et la biologie, mais touchent aussi aux mathématiques ou à l'informatique qui en fournissent les outils. Sur ce parcours de recherche dans plusieurs disciplines, j'ai rencontré des difficultés que je retrouve aujourd'hui en abordant de nouvelles disciplines que sont les EIAH (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage

Humain) et la didactique : acquérir le langage d'une nouvelle discipline, comprendre les problèmes qui se posent dans cette discipline avec sa façon de délimiter les situations et les systèmes, élaborer des questions de recherche pertinentes et obtenir les résultats associés, et enfin, discerner les présupposés et fondements théoriques de la discipline (comme la biologie ou la didactique) ou sous-discipline (comme l'écologie comportementale ou la didactique de la biologie).

Au-delà de mon expérience personnelle, il me semble que l'on assiste aujourd'hui à une multiplication des disciplines et qu'elles ont du mal à dialoguer. Or toute situation qui fait problème (et pour laquelle on peut avoir besoin de faire appel par exemple à la modélisation) est par nature transdisciplinaire, littéralement : « au-delà des disciplines ». Une situation-problème peut être vue sous l'angle d'une discipline ou d'une sous-discipline mais il n'y a jamais qu'un seul angle de vue possible (sauf pour des problèmes ad-hoc de manuels scolaires). De plus, les frontières entre disciplines ne sont pas rigides ni imperméables, elles évoluent avec le temps.

Pourquoi est-il utile de faire dialoguer les disciplines ?

Toute expérience humaine apparaît comme « une » (e.g. notre relation au soleil) et les disciplines apparaissent comme éclatées, en particulier aux yeux des étudiants. Par exemple, si on s'intéresse au soleil, on pourra souligner son rôle par rapport à la terre et la vie sur terre : on pourra ainsi envisager la gravitation, le mouvement des planètes, la lumière, l'hydrosphère, l'atmosphère, la photosynthèse qui relèvent des disciplines physiques, biologiques, géologiques et chimiques. On pourrait aussi s'intéresser au rôle du soleil dans les sociétés humaines (institution des calendriers, grands mythes solaires, Morin 1997).

Selon E. Morin (1997) « *la prévalence disciplinaire, séparatrice, nous fait perdre l'aptitude à relier, l'aptitude à contextualiser, c'est-à-dire à situer une information ou un savoir dans son contexte naturel. Nous perdons l'aptitude à globaliser, c'est-à-dire à introduire les connaissances dans un ensemble plus ou moins organisé. Or les conditions de toute connaissance pertinente sont justement la contextualisation, la globalisation.* » La problématique du dialogue entre disciplines se pose aussi dans le cadre de l'apprentissage et de l'enseignement (Rege Colet, 2002). E. Morin plaide pour une réforme (de l'enseignement), porteuse d'un vrai changement de paradigme, qui doit être pensée non seulement au niveau de l'université, mais au niveau de l'enseignement primaire. Il invoque pour cela la « pensée complexe », qu'il appelle aussi la « pensée reliante ».

Dans le contexte de ce mémoire, ces questions sont abordées car la modélisation formelle est l'une des situations particulières où le dialogue entre disciplines est crucial puisqu'elle repose sur un enseignement des mathématiques aux biologistes ou aux physiciens (chapitres 2 et 3).

Pourquoi le dialogue entre disciplines est-il difficile ?

Il y a bien sûr la barrière de la langue. Chaque discipline a son propre langage, ses méthodes, ses concepts, ses pratiques, ses « grands hommes », bref sa culture.

N'y a-t-il pas aussi des positions épistémologiques qui sont difficiles à discerner, le plus souvent, et qui ne sont pas les mêmes d'une discipline à l'autre, voire d'une sous-discipline à l'autre.

Comment rendre ce dialogue possible, à des fins utiles ?

Il y a plusieurs façons de faire dialoguer et coopérer plusieurs disciplines : la réalisation d'une tâche ou d'un produit qui engage plusieurs disciplines, l'étude d'un même thème par plusieurs éclairages, croisés, comparatifs, en opposition ou simplement juxtaposés, l'élaboration d'un concept commun... On peut distinguer ainsi différents degrés de coopération, allant de la pluridisciplinarité à la transdisciplinarité en passant par l'interdisciplinarité.

« *La pluridisciplinarité concerne l'étude d'un objet par plusieurs disciplines à la fois* » (Nicolescu 1996, président du CIRET, centre international de recherches et études transdisciplinaires). Ainsi, une formation universitaire multidisciplinaire propose aux étudiants une juxtaposition des regards disciplinaires sur une même thématique.

« *L'interdisciplinarité a une ambition différente de celle de la pluridisciplinarité. Elle concerne le transfert des méthodes d'une discipline à l'autre* » (Nicolescu 1996). Il y a des degrés divers de transfert : des méthodes expérimentales d'une discipline (physique) utilisées pour une autre (biologie), des méthodes formelles (modèles de percolation) d'une discipline (mathématiques) réinvesties dans une autre (en physique), ou la création d'une branche d'une discipline (comme les bio-mathématiques) au contact d'une autre (biologie). L'interdisciplinarité, selon JP Kesteman (2004), est une démarche, sans économie de savoirs disciplinaires. Elle est donc soumise à un partage des savoirs, autrement dit un partage des pouvoirs. Elle remet en cause le cloisonnement des disciplines et défend l'ouverture par le dialogue (« arriver à se parler »).

Qu'en est-il de la cohérence épistémologique entre les pratiques de deux disciplines ? Peut-on juxtaposer les disciplines ou transférer l'une dans l'autre sans se soucier de cette cohérence ? L'épistémologie s'est intéressée longtemps à la recherche disciplinaire et seulement récemment à une « *épistémologie des interfaces disciplinaires* » (Legay et Schmidt 2004, p 14). L'épistémologie nous permet-elle de trouver des réponses à ces questions ?

La transdisciplinarité, une piste de réponse.

*« La transdisciplinarité concerne, comme le préfixe trans l'indique, ce qui est à la fois entre les disciplines, à travers les différentes disciplines et au-delà de toute discipline. Sa finalité est la compréhension du monde présent, dont un des impératifs est l'unité de la connaissance. »* (Nicolescu 1996)

Y a-t-il quelque chose entre et à travers les disciplines et au delà de toute discipline ? Selon R. Nifle (fondateur de l'Institut de l'Humanisme Méthodologique), on peut supposer que c'est *« l'homme qui confère le caractère d'unité à ses expériences-objets, expériences-phénomènes, expériences-situations en les désignant, en en faisant des objets de considération. Auquel cas, nous avons la clé de toute transdisciplinarité. Seul l'homme est transdisciplinaire. La réalité étant réalisation structurée de l'expérience humaine, les disciplines doivent alors être comprises non comme des découpages dans l'approche du réel mais comme des "cheminements disciplinés", au sens traditionnel du terme discipline, par lesquels il est possible d'accéder au Sens d'une réalité, d'en reconnaître les dimensions et structurations et d'y entreprendre tout projet selon les finalités humaines sans lesquelles il n'y aurait d'ailleurs ni science, ni recherche, ni enseignement. »* (Nifle, 2004a).

Selon JP. Kesterman (2004), la transdisciplinarité replace le sujet au cœur de l'apprentissage. A une tendance de l'apprentissage « utilitariste » centré sur l'objet de connaissance, visant la productivité et la réussite économique, il oppose une tendance « utopique » centrée sur l'homme en quête de sens et de connaissances sur le monde et lui-même.

### **3.4 Conclusion**

Le cadre formel des modèles m'a permis de rapprocher la physique statistique et l'écologie comportementale (voir les deux sections précédentes). Nous avons vu certaines des approches communes à ces deux domaines, la recherche d'optimum (énergie ou fitness), la recherche d'équilibre (équations dynamiques), les simulations numériques (e.g. automates cellulaires). Différents auteurs ont jeté ainsi des ponts entre physique et biologie sur la base d'un cadre formel. Les systèmes complexes apportent de nombreux exemples, rapprochant par exemple la complexité d'un réseau d'atomes à celle des insectes sociaux (Benkirane 2002).

Un nombre croissant de biologistes utilisent les modèles formels (les statistiques, les simulations numériques, les systèmes dynamiques, les équations discrètes, etc) qui ont un impact sur pratiquement tous les domaines de la biologie (génétique, génétique des populations, biologie moléculaire, écologie, physiologie, neurosciences, etc.). Il peut être utile d'apprendre à utiliser tel ou tel outil mathématique. Eventuellement, le biologiste consultera un mathématicien ou un informaticien pour résoudre un problème. La véritable difficulté se situe à un autre niveau. Il faut pouvoir traduire en termes

mathématiques une question de biologie, puis analyser des données et interpréter des solutions dans les deux langages.

Les mathématiques sont un langage qui contribue à la compréhension des situations biologiques. L'enseigner comme tel a été l'un des défis du projet MathSV qui sera présenté au chapitre 3, en particulier lors de la mise en place d'un apprentissage par problème (APP). L'enseignement de la modélisation formelle dans les sciences expérimentales est un enseignement de nature transdisciplinaire au coeur duquel se trouve le rapport entre le modèle et l'expérience. Ici, l'expérience est entendue au sens large comme celle d'un apprenant qui, dans une démarche de modélisation, est confronté au phénomène biologique ou physique. Pour concevoir des dispositifs pédagogiques d'apprentissage de la modélisation en sciences expérimentales (chapitre 3), nous n'avons d'autre choix que de comprendre la nature de ce rapport (chapitre 2).

## Chapitre 2

### Une typologie des fonctions des modèles formels<sup>1</sup>



**Objectif :** construire une typologie des fonctions des modèles à partir d'une analyse du rapport entre modèle et expérience.

**Résumé :** j'explore le lien entre la manière dont on modélise en tant qu'expert ou chercheur et la manière dont on apprend à modéliser en tant qu'étudiant, et j'admets que ce lien repose sur le rapport expérience/modèle. La typologie est construite pour le cas particulier des modèles formels (utilisant un formalisme mathématique, statistique ou informatique). Pour chaque type de modèle, une option pédagogique est proposée, en particulier sur l'usage des simulations. Je présente des exemples de modèles en me basant principalement sur des exemples de recherche et d'enseignement de la modélisation en biologie.

---

<sup>1</sup> Ceci est une version revue et allongée d'un article qui va paraître dans la revue ASTER n°43.

## 1. Introduction : quelques définitions

Commençons par quelques définitions servant de point de départ à cette étude. Il ne s'agit pas de définitions universelles mais du sens dans lequel des termes sont employés dans ce chapitre. Le fil conducteur et la structure générale du chapitre sont présentés brièvement à la fin de cette introduction.

Le modèle, la modélisation et la simulation sont des termes souvent employés dans la recherche, en sciences expérimentales, en didactique et en épistémologie. Aussi, il est utile de préciser ce que l'on entendra par ces termes dans un texte qui prétend emprunter à ces trois disciplines.

Je m'intéresse aux modèles qui rendent compte de l'expérience. Au sein de la biologie, il y a plusieurs sortes de modèles (pour un ouvrage très complet sur les modèles en biologie, leur nature, leur fonction, leur construction, Legay, 1973). En physique, la notion de modèle, leur nature et leur fonction, est discutée dans de nombreux ouvrages de didactique, histoire ou épistémologie des sciences (e.g. Varenne 2005 et ses références).

Les modèles envisagés ici sont basés sur les mathématiques, « *un langage permettant de comprendre la dialectique qui va sans fin, et dans les deux sens, de l'esprit aux choses* » (Bachelard, 1971, p112). Soulignons qu'il s'agit ici d'esprit et de choses et qu'apparaît le mot langage sur lequel nous reviendrons plus loin. Nous nous intéresserons donc au « *contact entre expérience et mathématiques* » (Legay, 2000) parmi d'autres formes de modèles. Plus exactement, on se focalisera ici sur ceux qui reposent sur les outils mathématiques, statistiques ou informatiques. Le raccourci *modèles formels* sera utilisé pour les désigner. Ces outils, on le verra, ont un double rôle à jouer, celui d'instrument d'analyse et celui de modèle, de construction formelle permettant de rendre l'observation intelligible (Martinand, 1994, p. 131).

La démarche de modélisation formelle, si on la réduit à sa plus simple expression, consiste à isoler un système et des objectifs d'étude à son propos, puis à formaliser ces objectifs. Isoler un système, c'est « *limiter le champ d'une situation et en extraire un ensemble cohérent* » (Legay, 1997). On fait, chemin faisant, plusieurs hypothèses, à la fois sur les composants essentiels du système et sur les relations entre ces composants.

Des *simulations* peuvent être conçues par le chercheur ou par l'enseignant. Une simulation numérique est utilisée par le scientifique en lien avec un modèle, un modèle dynamique en général. La simulation va résoudre, de manière explicite ou pas pour l'utilisateur, les équations de ce modèle représentant l'évolution du système. Très souvent, la simulation est une imitation du phénomène. Il y a donc quelque chose de

commun aux deux. Nous en reparlerons dans la suite.

De Jong & van Joolingen (1998) proposent deux catégories de simulations à usage pédagogique : celles qui reposent sur un modèle conceptuel (dynamique ou statique, qualitatif ou quantitatif, continu ou discret, etc) et celles qui proposent un modèle opératoire (e.g. un simulateur de vol, une dissection virtuelle). La simulation est en général interactive, elle permet à l'utilisateur de changer des paramètres, de sélectionner des données, de créer des graphes... Plusieurs logiciels permettant de créer ou de faire tourner des simulations peuvent être mentionnés, de part les usages pédagogiques variés qu'ils permettent. Par exemple, il y a les logiciels de programmation (classiquement utilisés en cours de modélisation, on aura Maple©, SciLab©, etc), les logiciels de modélisation dynamique déterministe (e.g. Stella©), les logiciels de statistique (e.g. le logiciel libre R). En référence à ses usages dans un cadre pédagogique, on entendra donc par simulation une application, développée avec un outil logiciel ou *Web*, faisant des calculs numériques à partir d'un modèle.

Une simulation peut parfois s'accompagner d'une *animation*, qui est alors un graphique animé sur lequel on peut agir. Les actions de l'utilisateur sont prises en compte grâce à la simulation et donc au modèle. Cette animation représente par exemple le déroulement dans le temps du phénomène, ou bien les constituants d'un objet d'étude, de façon animée pour en faciliter l'accès. Ces animations, ces mises en scènes, sont créées dans un but pédagogique (Chomat et al. 1992, Tversky et al 2002) ou bien par le chercheur pour visualiser le déroulement dans le temps de son « expérience numérique ».

Un mot qui sera très souvent utilisé est le mot *expérience*. Dans ce chapitre, il est employé au sens large et usuel pour parler d'une expérience humaine, qu'elle soit à caractère pédagogique, scientifique, ou autre. Quand cela sera nécessaire, le mot sera accompagné d'un adjectif pour préciser de quelle expérience on parle, par exemple s'il s'agit d'une *expérience scientifique* (au laboratoire de physique, de biologie, etc). On pourra se référer à Coquidé 2003 pour une présentation sur la polysémie du terme expérience. Je reviendrai sur ce terme dans l'introduction du chapitre 3.

La section qui suit est une revue de l'enseignement de la modélisation en biologie à l'université et des problèmes pédagogiques posés par cet enseignement. Nous entendons par enseignement de la modélisation des cours où l'on propose aux étudiants d'utiliser, modifier ou construire des modèles, dans le but de répondre à une question ou de résoudre un problème. Puis, le point de vue des scientifiques qui conçoivent ou utilisent des modèles est abordé (section 3) car nous pensons qu'il y a un lien entre la manière dont on modélise en tant qu'expert ou chercheur et la manière dont on apprend à modéliser en tant qu'étudiant. Et nous tenterons de préciser ce lien. Un cadre théorique est présenté en section 4 à partir duquel est construit la typologie des fonctions des modèles (section 5). Cette étude théorique aboutit à quatre fonctions des modèles pour celui qui est en situation de résoudre un problème ou répondre à une question par la modélisation (donc aussi bien pour le professionnel que pour l'étudiant). Ces fonctions

des modèles sont de « calculer », « décrire », « expliquer » ou « indiquer ». Des pédagogies et des usages des outils de simulations privilégiés pour chaque fonction sont présentés.

## 2. Unité d'enseignement de modélisation en biologie

### 2.1 Faut-il enseigner la modélisation ?

Cette question revêt de multiples facettes : à quel niveau enseigner la modélisation à l'université ? Quelle modélisation enseigner ? Doit-on l'enseigner comme telle, ou comme approche pour résoudre des problèmes dans un sous-domaine de la biologie ? Autrement dit, s'agit-il d'un cours de mathématiques, un cours de biologie ou un cours de modélisation ?

L'étude présentée ici est centrée non pas sur la nature épistémologique mais sur la fonction des modèles (e.g. pour le biologiste), ceci dans le but d'envisager un enseignement de la modélisation au début d'un cursus universitaire où les étudiants ne se destinent pas forcément à une formation professionnalisante de biologiste ou d'expert en modélisation.

Orange (1997) avance qu'apprendre la modélisation, c'est acquérir une compétence : la maîtrise du problème de mise en concordance des faits et de la théorie. Il s'agit de maîtriser de « véritables problèmes scientifiques », à la fois les outils théoriques, les règles, le formalisme mais aussi un savoir-faire de résolution de problème par les modèles (orange 1997). Ceci renvoie à la pratique du chercheur qui construit ses problèmes dans une perspective de modélisation. Le problème est à l'origine de la connaissance (Poper cité dans Orange 2005). C'est le chemin de connaissance de l'apprenant qui peut s'inspirer de celui du chercheur ; ils sont différents mais possèdent quelque chose de commun, un lien. Je parlerai de la nature de ce lien quand j'aurai présenté le cadre théorique sur lequel je m'appuie (section 4). Retenons pour le moment que la construction de modèle implique une connaissance théorique (des modèles, des concepts et outils qu'ils utilisent) et une connaissance pratique (utiliser le modèle pour résoudre des problèmes). Il s'agit bien ici de proposer des pistes pour un enseignement de compétence et connaissance (mais peut-on jamais les dissocier) pour des étudiants qui doivent acquérir la maîtrise de la mise en concordance des faits et de la théorie. Ceci nous amène à nous interroger sur la nature du rapport entre l'expérience scientifique et le modèle (section 4).

Un des arguments en faveur de l'enseignement de la modélisation est son utilisation courante par les biologistes. Examinons rapidement les utilisations qu'ils font des modèles dans un contexte académique et dans un contexte d'expertise. Dans un contexte

académique, ce sont des expérimentateurs qui adaptent ou utilisent des modèles ou des théoriciens qui les conçoivent. Apparaît alors une distinction entre ceux qui analysent des données recueillies par eux-même ou par leurs collaborateurs et qui construisent des modèles que l'on qualifie de « *data-driven* » et ceux qui conçoivent des modèles pour répondre à des problématiques biologiques ou pour développer de nouvelles méthodologies et que l'on qualifie de « *model-driven* » (chapitre 1, section 3). Par ailleurs, il y a ceux qui utilisent ou adaptent des modèles dans des contextes d'expertise, par exemple dans le cadre de la gestion forestière (Lett, 1999), de la conservation des espèces (Lebreton, 1973), de la gestion de pêcheries (Johnson, 1995). Dans ces contextes d'expertise, un certain nombre de difficultés peuvent apparaître.

- Au niveau de la définition du problème : les finalités sont multiples et conduisent à des objectifs qui peuvent être peu clairs voire contradictoires.
- Au niveau de la formalisation : les lois théoriques ou simplement empiriques sur lesquelles baser le modèle ne sont pas forcément connues.
- Au niveau des données expérimentales : ces données peuvent être insuffisantes voire entachées d'erreur.

Les modèles « *d'expertise* » (modèles de décision, Legay, 1997 et section 3) doivent tenir compte de ces incertitudes.

Doit-on enseigner la modélisation dans un cours de mathématiques, dans un cours de biologie ou bien dans un cours dédié à la modélisation ? Dans les années 1960-1970 notamment, plusieurs formations universitaires ont commencé à proposer des cours de mathématiques, spécifiques aux cursus de biologie, incluant certains thèmes négligés dans un cours de mathématiques s'adressant à des mathématiciens ou des ingénieurs (comme les statistiques, les équations discrètes) et prenant des exemples dans la biologie (plutôt que dans la physique). Aujourd'hui, aux Etats-Unis comme en France, ce genre de formation n'est plus (ou pas) systématiquement incluse dès le début d'un cursus universitaire de biologie. Si elle l'est, c'est bien souvent portée par une équipe de mathématiciens avec les problèmes que cela pose pour construire des situations authentiques de biologie. L'enseignement oscille entre deux extrêmes, du « centré-mathématiques » (la biologie est un prétexte) au « centré-biologie » (les mathématiques sont des recettes). Doit-il y avoir un cours de mathématiques spécifique aux biologistes et enseigné par les biologistes est une question encore débattue. L'université Claude Bernard, Lyon 1, est un exemple remarquable à ce titre puisqu'un cours interdisciplinaire mathématiques/biologie organisé par les membres du laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive existe depuis sa création par J-M. Legay, il y a plus de trente ans.

Cependant, les cours de modélisation sont encore plus rares que les cours de mathématiques, en particulier dans les trois premières années universitaires (licence). Les modèles sont utilisés dans des cours thématiques, par exemple un cours de dynamique de population ou d'épidémiologie, et plutôt au niveau master. Pourquoi ? Certains avanceront que la modélisation est plus un art qu'une science, une compétence

qui reste en grande partie implicite pour le chercheur ou l'expert (et donc peut-être difficile à transmettre autrement que pas la multiplication des exemples).

## **2.2 Comment enseigner la modélisation à l'université ?**

On peut distinguer trois tâches dans l'approche et la compréhension des mécanismes de modélisation : (1) utiliser un modèle, (2) modifier un modèle, (3) construire un modèle. La première activité familiarise avec les phénomènes, biologiques ou physiques, et leur formalisation. Il peut s'agir, par exemple, d'apprendre à représenter graphiquement l'évolution temporelle des variables d'un système ou d'étudier mathématiquement les solutions et prédictions d'un système d'équations dynamiques. Avec la deuxième et la troisième activité, il devient possible d'aborder explicitement la nature, l'utilité et les limites d'un modèle, à des degrés différents selon que l'on adapte certains modèles existant ou que l'on en construit de nouveaux.

Enseigner la construction de modèles nécessite d'en dégager les étapes importantes. Pour fixer les idées, disons que ces étapes sont grossièrement de poser un problème, analyser ce problème, le traduire en langage formel (mathématique ou autre), y répondre par résolution numérique ou formelle et enfin interpréter les résultats, faire des prédictions, prendre des décisions. Ainsi, résoudre des équations différentielles (faire un diagramme de phase par exemple) procède bien de la modélisation mais dans un sens très réduit puisque ne faisant appel qu'à certaines étapes et en réduisant d'autres au minimum. Cependant, ce type d'activité est pratiquement le seul proposé au niveau de la licence où, de plus, les étudiants travaillent presque toujours avec des modèles qu'on leur fournit. Nous avons entrepris une recherche non exhaustive des UE de premier cycle de biologie (L1 et L2) portant explicitement sur la modélisation. Nous en avons trouvé peu (documents 1 à 4).

**Document 1. Unité d'enseignement « *Biologie et modélisation* »,  
université Claude Bernard Lyon I**

**Intitulé de l'UE :** Biologie et Modélisation

**Niveau :** L1 ou L2

**Parcours :** Mathématiques, informatique ou biologie

**Organisation :** 15h de cours magistraux et 32h de travaux pratiques

**Source :** université Claude Bernard Lyon 1 <http://spiral.univ-lyon1.fr>

Deux champs complémentaires sont abordés :

l'analyse statistique de données écologiques et la modélisation mathématique. Le premier champ intègre les enseignements de statistique par l'utilisation du logiciel R. Le second champ intègre les enseignements de mathématiques par l'utilisation du logiciel Maple. Le pont entre les deux champs est établi autour de l'activité de modélisation.

Analyse statistique de données écologiques et modélisation :

- statistiques descriptives
- tirages aléatoires et simulation d'échantillonnages

Modélisation de la dynamique des populations :

- modèles en temps continu
- modèles en temps discrets
- modèles spatiaux

Compétences acquises :

- Méthodologiques

Analyser et interpréter les données biologiques afin d'en extraire des informations en vue de la compréhension et de la modélisation des processus du vivant.

- Techniques

Utilisation de logiciels informatiques pour intégrer les enseignements de mathématiques et de statistique dans le contexte de la biologie.

**Document 2. Unité d'enseignement « Introduction à la modélisation en biologie »,  
université Paris-Sud XI**

**Intitulé de l'UE :** Introduction à la modélisation en biologie

**Niveau :** L2

**Parcours :** Biologie

**Organisation :** 50h de cours magistraux, 21h de travaux dirigés et 8h de TP

**Source :** Faculté des Sciences d'Orsay <http://www.lmd.u-psud.fr>

Objectifs :

La modélisation des phénomènes biologiques est une discipline originale et en plein développement qui nécessite de pouvoir franchir les frontières disciplinaires. Un modèle n'est pas une simple mise en ordre de l'observation. Les modèles biologiques modernes cherchent à identifier, au-delà des corrélations, les liens de causalité susceptibles d'exister entre des phénomènes en apparence disjoints. Lorsque la discipline a acquis une maturité suffisante, le modèle devient mathématique, ce qui permet de clarifier les hypothèses et d'en étendre les capacités d'analyse.

L'enseignement proposé a un triple but :

- Donner aux étudiants une méthode de travail alliant le substratum biologique aux outils de traitement mathématiques et informatiques.
- Les familiariser avec le maniement des outils logiciels dédiés à la modélisation.
- Donner une première idée de l'intérêt, de la diversité et de la puissance de la modélisation en biologie.

Résumé des contenus :

L'outil informatique : apprentissage de la programmation en langage Scilab.

L'outil mathématique : introduction aux méthodes de calcul numérique.

Réflexion et expérimentation sur la notion de modèle en biologie.

Ajustement des paramètres d'un modèle aux données.

Introduction à la modélisation de systèmes dynamiques.

Modélisation de processus stochastiques.

**Document 3. Unité d'enseignement « *Modélisation en biologie* »,  
université Montpellier II**

**Intitulé de l'UE :** Modélisation en biologie

**Niveau :** L1 ou L2

**Parcours :** Biologie

**Organisation :** 21h de travaux dirigés et 9h de travaux pratiques

**Source :** Université Montpellier 2 [www.ufr.univ-montp2.fr/documents/LMD](http://www.ufr.univ-montp2.fr/documents/LMD)

Objectif pédagogique :

Montrer comment la modélisation peut aider à la compréhension des processus en Biologie, et comment la Biologie peut apporter de nouvelles façons de voir les modèles. Les TP consisteront en des simulations sur ordinateur.

Programme des enseignements :

essentiellement la modélisation en biologie des populations (écologie, génétique)

- Qu'est-ce qu'un modèle et pourquoi faire un modèle ?
- Modèles de dynamique des populations : croissance exponentielle, croissance régulée (chaos déterministe), relations hôtes-parasites et proies-prédateurs
- Modèles de génétique des populations : notions de fréquences alléliques et génotypiques, de régime de reproduction ; les différentes forces évolutives
- Autres modèles en biologie (écosystèmes, physiologie, régulation, génétique du développement)

**Document 4. Unité d'enseignement « Modélisation et simulation »,  
université Joseph Fourier Grenoble I**

**Intitulé de l'UE :** Modélisation et simulation

**Niveau :** L1

**Parcours :** Tous (étudiants venant principalement du parcours biologie)

**Organisation :** 3h de cours magistral, 20h de travaux dirigés, 20h de travaux pratiques et 15h projet

**Source :** Université Joseph Fourier Grenoble 1 <http://dsu-net.ujf-grenoble.fr>

Compétences visées :

- Appréhender la démarche scientifique que la capacité des moyens informatiques d'aujourd'hui autorise autour d'un unique thème: le temps.
- Appréhender le concours des différentes compétences et disciplines dans les contextes de la modélisation et de la simulation.
- Apprendre quelles sont les différentes étapes du processus de modélisation et de simulation: la recherche des variables d'un modèle formel, l'établissement d'un modèle formel, sa critique, sa validation, son utilisation.
- Acquérir un savoir-faire technique élémentaire pour mener à bien un projet personnel d'enquête et de recherche bibliographique et présenter ses résultats par voie orale et par voie d'affiche.

Programme résumé :

1ère partie:

Enseignement intensif réparti sur 2 semaines début janvier, constitué de cours, TD et TP pour étudier le développement et la simulation de quelques modèles faisant intervenir le temps parmi les suivants:

- proie-prédateur;
- cinétique chimique;
- cinématique;
- pharmacologique;
- de type automate;
- croissance des plantes;
- bruit dans un signal.

Les TP permettront la récupération de données expérimentales ou la simulation informatique d'un modèle.

2ème partie:

Travail par binôme d'enquête et de recherche bibliographique sur un sujet libre lié au thème du temps: présentation orale individuelle d'une affiche (fin mars).

On note, à la lecture de ces quatre documents, que des catégorisations des modèles d'ordre disciplinaire peuvent être faites et sont souvent le fil conducteur des programmes d'UE : modèles basés sur des lois de la physique, sur des lois empiriques ou sur des lois statistiques, modèles discrets ou continus, déterministes ou stochastiques, modèles basés sur l'analyse de données ou sur des concepts, sur des outils mathématiques ou informatiques etc. Dans certaines UE cependant, il semble qu'il s'agisse avant tout d'apprendre une méthode, une démarche.

Un regard sur la situation aux Etats-Unis nous est offert par les conclusions d'un workshop réunissant un grand nombre d'universités américaines (Gross, 1992), sur le thème de l'enseignement des méthodes quantitatives en biologie. Leur point de départ est un constat des difficultés des étudiants à faire le lien entre cours de mathématiques et cours de biologie, des résultats très médiocres en mathématiques et de l'anxiété voire du rejet suscité par ces cours (je fais un constat similaire par mon expérience à Lyon 1). Un ensemble de difficultés rencontrées par les étudiants, lors des allers-retours entre biologie et mathématiques, ont été identifiées par les enseignants participant au workshop (Gross, 1992) :

- Comment bien poser le problème ?  
(énoncer correctement le problème verbalement de manière à pouvoir le formaliser ensuite, sélectionner une stratégie de modélisation appropriée, définir les bonnes variables)
- Comment traduire une information verbale en modèle formel ?
- Comment analyser des modèles existants ?
- Comment interpréter des résultats, des prédictions du modèle ?

Dans le cadre des enseignements scientifiques du primaire et du secondaire, Genzling et Pierrard (1994) portent quant à eux un regard de didacticiens sur ces questions qui rejoint sur certains points les considérations précédentes. Ils proposent trois approches complémentaires de la modélisation : (i) se représenter un ensemble de situations, unifier les points de vue, rapprocher des situations différentes (ii) répondre à des questions, relier des phénomènes à des descripteurs (propriétés, grandeurs, paramètres) (iii) tester la validité d'un modèle. Certains auteurs, oeuvrant plutôt dans les sciences de l'éducation ou sciences cognitives iront jusqu'à proposer un mode d'apprentissage privilégié pour certaines approches de la modélisation (de Jong et van Joolingen, 1998). C'est ce type d'association que nous tenterons de systématiser et de fonder sur une base théorique.

### **2.3 Options pédagogiques pour l'enseignement de la modélisation**

Comme cela est souvent souligné, par exemple par A. Weil-Barais Lemeignan

(1994), toute proposition d'enseignement est nécessairement supportée par une conception de l'apprentissage, explicite (dans le cadre d'une recherche) ou implicite (cas le plus courant dans le cadre des enseignements traditionnels) : « *L'étude de l'enseignement et de l'apprentissage de la modélisation suppose de prendre un certain nombre d'options : d'ordre épistémologique (quelles conceptions des modèles va-t-on prendre en compte ?), disciplinaire (quels sont les modèles qui du point de vue de la discipline méritent d'être enseignés ?), pédagogique (quels moyens mettre en oeuvre aux plans matériel et humain ?), psychologique (quel cadre théorique d'apprentissage ?) et social (quelles finalités de l'enseignement poursuivre ?)* » (Weil-Barais et Lemeignan, 1994).

Dans la suite, nous passerons en revue certaines des options qui s'offrent à celui qui décide d'enseigner la modélisation en biologie à l'université, afin de proposer un cadre cohérent permettant de discerner puis de mettre en pratique les liens de parenté entre ces options.

### **3. Les modèles vus par les scientifiques qui les conçoivent**

Dans cette étude, nous nous référons principalement aux réponses apportées par des biologistes qui conçoivent des modèles à la question de la fonction des modèles au coeur de leur discipline. Nous ferons plus rarement référence à la physique.

On l'a vu auparavant, le modèle est défini comme un trait d'union entre l'esprit et les choses (Bachelard 1971), entre les mathématiques et l'expérience (Legay 1997), entre un problème concret et sa solution, entre la théorie scientifique et les phénomènes réels. A. Tiberghien (e.g. dans Tiberghien et Vince 2004) parle de la modélisation en physique comme étant la base d'une décomposition des savoirs en deux mondes. Le monde matériel décrit par l'expérimentateur en termes d'objets, d'événements, de faits expérimentaux. Et le monde des théories, regroupées avec les modèles, dont sont issues des relations entre grandeurs, des prévisions, des explications, des interprétations. La « mise en relation » de ces deux mondes serait faite par le processus de construction d'un modèle ou bien d'un environnement de simulation. C. Orange (1997) présente le modèle en biologie comme l'« interface » entre le « *registre empirique* » (les phénomènes dont le modèle rend compte) et le « *registre explicatif* » (les éléments permettant de construire différents modèles, de résoudre une classe de problèmes). Cet auteur distingue les fonctions heuristiques et explicatives du modèle qui seraient plus proches du registre explicatif, des fonctions prédictives liées au registre empirique. Ces différents points de vue nous offrent une vision d'un monde de phénomènes et d'un monde de théories qui sont liés par la modélisation, mais comment ? Y-a-t-il un lieu pour ce « lien », cette « interface » ?

La question de l'aller-retour entre théorie et expérience renvoie à celle du rapport de prééminence entre théorie, modèle et expérience (Hacking, 1989 ; Legay et Schmid, 2004). La théorie scientifique se distingue du modèle, quoi que de façon pas toujours claire et certains emploieront l'un pour l'autre pour désigner la même chose. Disons qu'une théorie est plus générale, qu'elle explique le fonctionnement d'un ensemble de phénomènes et qu'elle a été largement vérifiée (Hilborn & Mangel, 1996). Legay (1997, 2004) parle d'une méthode descendante d'élaboration des modèles dans laquelle la théorie précède tout le reste (théorie → modèle → expérimentation) et d'une méthode ascendante (situation → modèle → théorie). Dans le second cas, il s'agit donc de partir d'une situation dont le modélisateur fait l'expérience. Ce faisant, il fera appel ou non à des expériences scientifiques (de terrain ou de laboratoire). Hacking (1989) montre, en se basant principalement sur l'histoire de la physique, qu'une expérimentation est toujours précédée par un semblant de théorie ou modèle. En biologie, la méthode descendante est une approche plus répandue en recherche moderne qu'elle ne l'a été autrefois (Israel cité dans Coquidé, 2000).

Nous allons à présent examiner deux ouvrages écrits par des biologistes (Hilborn et Mangel 1997 ; Legay 1997) envisageant le modèle lorsqu'il est un instrument de recherche pour l'expérimentateur.

Le biométricien Jean-Marie Legay propose trois types de modèles en fonction de leurs rôles pour l'expérimentateur. Notons tout d'abord sa définition de l'expérience scientifique (Legay 1997) : « *toute procédure organisée d'acquisition d'information qui comporte, dans la perspective d'un objectif exprimé, une confrontation avec la réalité* ». Dans les trois paragraphes suivants, je détaille sa typologie des fonctions des modèles et je l'illustre avec l'exemple de la dynamique de population et du modèle exponentiel continu qui sera repris en section 5.

Le premier type est qualifié de « *modèle d'hypothèse* ». Dans ces modèles, on admet un certain nombre de choses *a priori*, souvent en langage commun, comme par exemple des conditions initiales (valeurs initiales de paramètres), et l'expérimentateur cherche les conséquences résultant de ces hypothèses. Par exemple, on admet que l'évolution de la population humaine entre 1750 et 2000 peut être décrite par une fonction exponentielle. Modéliser la croissance de cette population consiste à superposer des points expérimentaux et cette fonction « au plus près » et en déduire une vitesse de croissance, une prédiction... Ici, on se base principalement sur le constat, dans un langage descriptif.

Le deuxième type est celui des « *modèles de mécanismes* » qui partent d'une proposition d'explication (hypothèse explicative) qu'il s'agit de tester. On peut proposer que le taux de croissance de la population est proportionnel à son effectif, écrire l'équation différentielle et la résoudre. Cela conduit à une solution exponentielle qui est justifiée par le mécanisme énoncé au départ. Ces modèles mettent l'accent sur les résultats du calcul et les performances du mécanisme explicatif.

Le dernier type comprend les « *modèles de décision* » et les « *modèles de prévision* » qui sembleraient être les moins connus mais les plus demandés actuellement (Legay, 1997). Ils prennent en compte la situation au sens large, y compris les intentions et des objectifs des personnes impliquées. L'intention et les prédictions potentielles arrivent très tôt dans la modélisation : par exemple il s'agit de contrôler les naissances d'une population afin de réduire sa croissance en deçà d'un certain niveau (pour le gouvernement Chinois). On peut tester les conséquences possibles de ses décisions sur des données réelles. Pour avoir une bonne probabilité de ne pas se tromper, on va se baser sur des modèles d'hypothèse et des modèles de mécanisme et définir le degré de précision dont on a besoin en fonction de l'enjeu. Les deux premiers types de modèles peuvent alors être pris en compte.

Le modèle intervient bien souvent en lien avec une nouvelle hypothèse. En effet, la démarche scientifique, qu'elle soit expérimentale ou théorique, est basée sur la génération et la validation d'hypothèses : il n'y a pas de modèle sans hypothèses explicites (Legay, 1997).

R. Hilborn et M. Mangel (1997), dans un ouvrage sur la modélisation en écologie, définissent un modèle comme la « *version simplifiée d'une hypothèse* ». L'hypothèse est, selon ces auteurs, une nouvelle proposition (explicative) à tester. Cette proposition peut aussi se voir comme la question à l'origine du projet de modélisation. Plusieurs modèles peuvent alors représenter une même hypothèse, tenter de répondre à une même question.

Illustrons cette notion d'hypothèse sur un exemple : les stratégies de récolte du nectar des fleurs (chapitre 1, section 2), l'hypothèse de base du modèle est que les bourdons maximisent la récolte de nectar s'ils tiennent compte de l'expérience passée, autrement dit, la fleur qui vient juste d'être visitée influence le processus de choix de la fleur suivante. On voit bien que cette hypothèse peut se reformuler comme une question. Ensuite, plusieurs modèles pourront être construits pour tenter d'y répondre. Citons-en trois (Motro et Schmida, 1995) :

1. Modèle « near-search » : la prochaine fleur visitée est toujours une des fleurs dans un voisinage immédiat (l'amas auquel appartient la fleur).
2. Modèle « far-search » : la prochaine fleur visitée n'est jamais la plus proche mais une fleur au hasard dans un autre amas de fleurs.
3. Modèle « near-far search » : la prochaine fleur visitée est une des fleurs voisines tant que le bourdon quitte une fleur avec nectar, mais dès que ce n'est plus le cas, il va choisir une fleur plus éloignée, prise en hasard dans un autre amas de fleurs.

Certains de ces modèles peuvent comporter des paramètres, comme par exemple le nombre d'amas de fleurs pris en considération lors d'une recherche « éloignée ». Chaque modèle peut se traduire par une expression mathématique donnant le nombre moyen de visites récompensées (visites de fleurs non encore vidées de leur nectar lors

d'une précédente visite) en fonction du nombre total de fleurs visitées. La question est de savoir quelle stratégie maximise ce nombre moyen que l'on relie directement à la quantité de nectar récoltée.

Plusieurs remarques :

- Un quatrième modèle, « random search », peut être considéré, soit comme un modèle de plus, soit comme « hypothèse nulle » (on parle aussi de « modèle nul », Gotelli, 1996), chaque modèle étant alors comparé (« testé » au sens statistique) à cette hypothèse nulle, individuellement.
- Chaque modèle est bien exprimé comme une version de l'hypothèse. De plus, chacun repose sur une « hypothèse de base du modèle » qui est formulée en langage naturel ci-dessus, et qui pourra être testée expérimentalement.
- Il est évident que l'hypothèse de base peut décrire correctement les choix des bourdons même si les quatre modèles cités sont rejetés après comparaison avec des données expérimentales. Il se peut simplement qu'un facteur n'ait pas été pris en compte dans aucun d'eux.

Différents usages du mot « hypothèse » ont été évoqués en parallèle, à propos de ce problème chez les bourdons. De même, les travaux en statistiques de Fisher, Pearson et d'autres, en particulier sur les « tests d'hypothèses », coïncident avec les développements philosophiques de Popper mettant en avant, dans la méthode scientifique, le fait de valider des « hypothèses » par des expériences scientifiques répétées (Hilborn et Mangel 1997, p15).

Comme JM. Legay, R. Hilborn et M. Mangel (1997) envisagent donc le modèle comme instrument pour l'expérimentateur (en précisant que ce n'est pas son seul usage). Le modèle lui permet, selon eux, de formuler une « hypothèse de base du modèle » comme une proposition explicative à tester, d'identifier les facteurs et mécanismes possibles, de se focaliser sur les plus importants, et enfin de faire des prédictions quantitatives.

Il semble que, dans les deux ouvrages cités, différents types de modèles (et différents types d'hypothèses) prédisent ou expliquent quelque chose. Les mots « prédiction », « explication » sont-ils toujours employés dans le même sens ? Mais surtout, on peut se demander s'il y a un modèle-instrument privilégié selon l'expérience de celui qui modélise, sa vision de la situation ? Je tenterai de répondre à ces questions dans les deux sections suivantes.

Envisagé comme un instrument, on ne peut pas dire du modèle qu'il est vrai ou faux (Hilborn et Mangel 1997). Un stylo n'est ni vrai ni faux, c'est un instrument qui peut servir, entre autres, à écrire et qui sera peu utile pour effacer. Un modèle est un outil qui fournit simplement des résultats plus ou moins valables dans un domaine plus ou moins étendu. Il peut être utilisé à bon ou à mauvais escient, la responsabilité en incombe à

l'utilisateur.

Pour conclure, il me semble que la démarche de modélisation se définit au travers d'une trialectique (voir section suivante) sujet (intentionnalité), objet (objectivation), projet (projection) : un projet de modélisation résulte du rapport entre un objet qui fait problème et un sujet, celui qui modélise et qui est porteur du questionnement, de l'intention. Une personne (sujet intentionnel) décide d'utiliser le stylo (objectivation) pour écrire (projection). Une autre l'utilisera peut-être pour appuyer sur les touches de son téléphone : il y a plusieurs projets possibles. Le modèle se définit dans le projet du sujet.

#### **4. Une base théorique pour une typologie des fonctions des modèles**

Si la trialectique sujet-objet-projet est prépondérante dans la modélisation, il semble difficile que le scientifique puisse être neutre, ni dans le système qu'il choisit d'étudier, ni dans sa vision de la science. Le type d'outils mathématiques qu'il utilise et le type d'expérience qu'il fait peuvent être révélateurs de cette vision. Toute la difficulté est de rester conscient de ce lien et de ne pas croire unique l'image que l'on se fait de la situation. C'est la multiplicité des points de vue sur la science, véritables positions épistémologiques, et leur lien avec la modélisation, son usage en recherche et dans l'enseignement, que nous tenterons d'examiner dans la section 5, dans un cadre théorique que je vais à présent introduire.

Dans cette étude, nous prendrons le parti de la primauté de l'expérience humaine : la réalité n'est pas donnée mais est toujours construction humaine. En effet, nous ne connaissons des phénomènes que nous choisissons d'isoler que ce que nos expériences nous en donnent à vivre, qu'elles soit triviales, pédagogiques ou scientifiques. C'est du rapport complexe entre expérience et modèle que nous allons discuter. Bien que ces deux termes puissent être pris au sens large dans cette section, nous rappelons ci-dessous le sens plus précis dans lequel nous les utiliserons pour notre analyse.

Modèle : Il s'agit des modèles formels construits dans un cadre non pédagogique, par l'expert ou le chercheur, et réinvestis pour l'enseignement de la biologie.

Expérience : Dans une démarche de modélisation, une personne est confrontée au phénomène biologique ; elle en fait l'expérience, c'est-à-dire qu'elle va l'éprouver ou bien le mettre à l'épreuve.

Une approche permettant de comprendre le rapport modèle-expérience a été développé par la théorie du Sens et des cohérences humaines (Niflé, 1986). Cet essai philosophique a donné lieu à de nombreuses applications théoriques, méthodologiques et pratiques, principalement dans des contextes non académiques. Dans le contexte académique, ces travaux ont été utilisés dans différents domaines : par exemple, les sciences de la gestion (Bessire et Baker, 2005), les sciences de l'éducation (Condete, 1984), la sociologie (Niflé, 1995), la didactique des langues (Forestal, 1991). En didactique des sciences expérimentales, C. Maisch a effectué un stage de master recherche sous ma direction et utilisé cette approche (Maisch, 2006) afin d'analyser des pratiques enseignantes, dans les Travaux Pratiques de physique et de biologie à l'université.

Dans le cadre de la théorie du Sens et des cohérences humaines, théories et modèles sont qualifiés de « *re-présentations* » d'une situation qui sont liées par « *homologie* » : modèle et situation sont homologues s'ils ont même « *Sens* ». Le Sens est une disposition d'être de la personne humaine ou d'une communauté, sa vision du monde, sa logique, sa cohérence, voire même sa théorie. Le Sens est toujours lié à un système de valeurs, par exemple c'est une position épistémologique ou une position (une théorie) sur l'apprentissage. Nous reviendrons sur cette notion de Sens au chapitre 3.

Dans le processus de modélisation, le modélisateur va chercher à re-présenter son expérience et utiliser (implicitement ou explicitement) un cadre théorique. Il faut entendre l'expérience au sens ci-dessus, c'est-à-dire l'expérience qu'a le modélisateur du phénomène, que celui-ci se soit déroulé sur la paillasse, sur un ordinateur, etc. Qu'est-ce qu'il y a de commun entre le modèle, l'expérience et la théorie ? Quel est le lien et quel est le lieu de ce lien ? La réponse donnée ici et dont nous allons explorer les conséquences est que c'est le Sens. Et ce Sens est porté par un sujet, une personne ou une communauté de personnes, qui établit ce lien, qui y consent. Le Sens du modèle est à la fois un signifiant et un signifié. Signifiant parce qu'il se présente sous une forme significative pour la communauté (des biologistes) et signifié parce qu'il véhicule l'expérience du sujet.

Les modèles sont ainsi des re-présentations de l'expérience et, de ce fait, deviennent à leur tour expérience, n'échappant pas au champ de l'expérience humaine. Ces modèles-expériences peuvent conduire à la réalisation d'expériences nouvelles, re-présentations des modèles. Prenons un exemple : une simulation (on parle aussi d'expérimentation virtuelle) est une re-présentation d'un modèle, tout comme peut l'être une expérience de laboratoire. En outre, les modèles peuvent donner lieu à d'autres modèles, par exemple un modèle verbal peut être re-présenté par un modèle mathématique. Ainsi, il y a souvent plusieurs étages de re-présentations et le point clé est que ces re-présentations partagent un Sens commun (par homologie). Par exemple, une expérience de laboratoire est re-présentée par un modèle qui est ensuite re-présenté par une autre expérience de laboratoire, ou bien par une simulation, pouvant à son tour

être re-présentée successivement par un modèle verbal puis un modèle formel.

Selon R. Nifle (2004b), si le Sens est conservé d'un modèle à l'autre, ou de la situation au modèle alors on pourra essayer de discerner ce Sens au travers de ces différentes re-présentations. "Re-présenter" une situation, c'est réaliser, re-mobiliser, une expérience (humaine) dans un même Sens mais sous une autre forme. Toute expérience humaine (y compris scientifique) est une réalité réalisée.

Le terme « situation » désigne ici un ensemble de phénomènes (disons biologiques), on pourrait dire une « réalité », telle qu'elle se présente à celui qui suit une démarche de modélisation et qui a pris la décision de délimiter cet ensemble. Une situation est un exemple de réalité réalisée qui peut être le point de départ de la modélisation (méthode ascendante, J-M. Legay, 1997 et section 3). Tout comme les termes « expérience » et « modèle » peuvent être employés dans un cadre plus large que celui de notre analyse (de l'enseignement de la modélisation en biologie), le terme « *situation* » désigne plus largement « un environnement, physique ou culturel, *mis au foyer de l'expérience d'un sujet, c'est-à-dire un environnement privilégié et expérimenté* » (Dewey 1938/1993).

Dans une optique qui me semble proche de celle du cadre théorique utilisé ici, S. Bachelard (1979) propose la définition suivante : « le modèle ... sépare le pertinent du non pertinent par rapport à la problématique considérée. En ce sens le modèle est un *fictif réalisé*. Il est un instrument d'intelligibilité d'un réel. »<sup>2</sup> Pour F. Bousquet (2001), « l'objet modèle étant réalisé, il va être utilisé à des fins de représentation (*représentation*) de situations /.../ Je représente (formalise) une représentation (un point de vue) à des fins de représentation (médiation) »<sup>2</sup>.

Dans la théorie du Sens et des cohérences humaines (R. Nifle, 1986), toute re-présentation possède trois composantes exprimées comme des relations entre trois dimensions :

- (1) une dimension intentionnelle (sujet),
- (2) une dimension objective (objet) et
- (3) une dimension projective (projet).

Bien que la dialectique sujet-objet soit prépondérante, d'autres philosophes ont introduit l'idée d'une réalité à trois dimensions. G. Bachelard, par exemple, note en 1934 que « la méditation de l'*objet* par le *sujet* prend toujours la forme du *projet* » (1934/1995, p. 15)<sup>2</sup>.

Les trois composantes (Nifle, 2004b) sont (voir aussi la figure) :

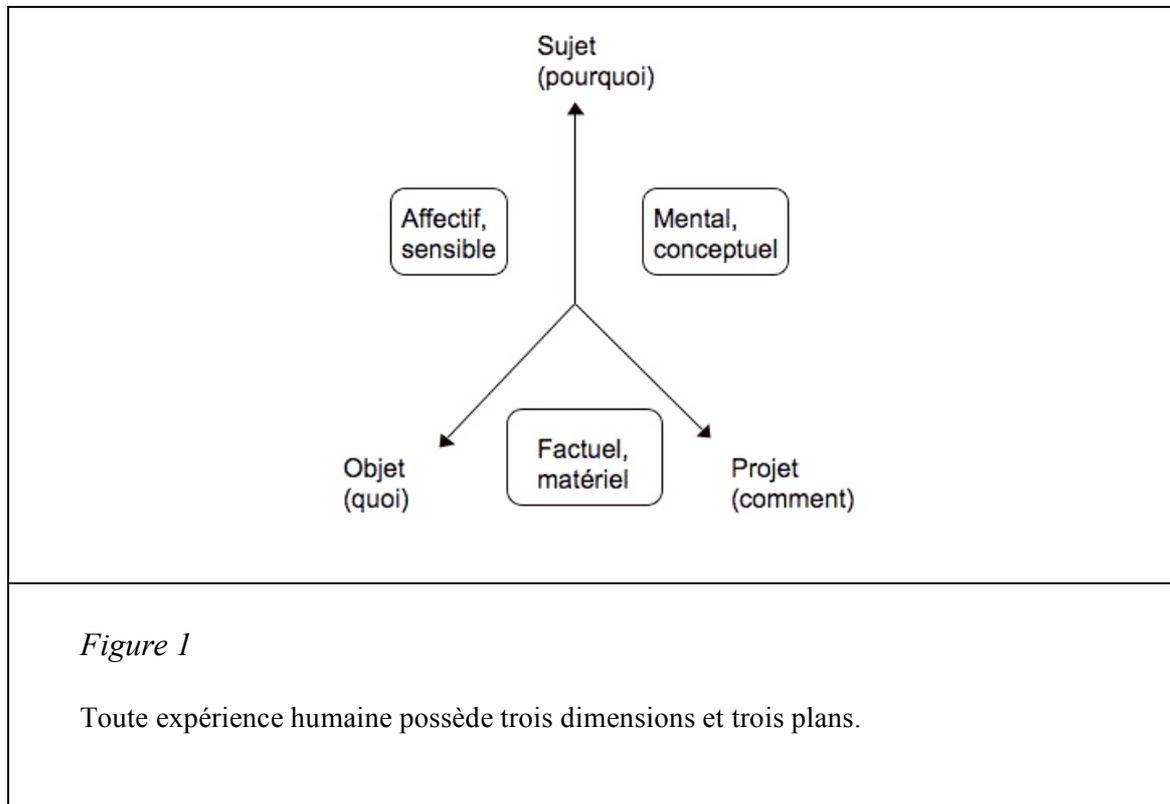
- (i) La composante sensible ou affective (relation sujet-objet). Ce sont les perceptions sensibles, le vécu et les appréciations.
- (ii) La composante factuelle ou matérielle (relation objet-projet). Ce sont les faits et le

---

2 Je mets des mots sont mis en italiques afin de souligner certaines parties de la citation.

produit d'opérations, d'actions.

(iii) La composante conceptuelle ou mentale (relation sujet-projet). Ce sont les concepts, les représentations mentales et les projections structurées.



Essayons d'abord d'examiner cette trialectique, le « *cohérentiel sujet objet projet* » (voir Nifle, 1996 et figure), sous l'angle de l'enseignement des sciences afin de mieux la cerner et aussi d'apercevoir son potentiel heuristique. Une série de remarques suivent à ce propos.

- D. Gooding (1992), en étudiant la manière dont les scientifiques (en particulier Faraday) construisent leurs productions, un modèle par exemple, souligne différents aspects de ce processus. Un des aspects est pour lui l'interaction entre « *concepts* », « *percepts* » et « *objects* » (ce dernier désignant à la fois les objets matériels et les événements perçus).

- On peut noter que ces « *concepts* » et « *percepts* » ne sont pas les mêmes d'un sujet à l'autre. Par exemple, ils sont certainement différents pour l'étudiant et pour le professeur (Tibergien et al, 2001). Pour apercevoir cette différence, la dimension *sujet* est primordiale. Même si la démarche scientifique, à transposer dans la classe, fait appel largement à la pensée rationnelle, dite convergente (Darley 1996), il ne faut pas éliminer la pensée dite divergente (Darley 1996), composante plus personnelle à chaque chercheur (capacité à se positionner dans un Sens en imaginant les termes du problème,

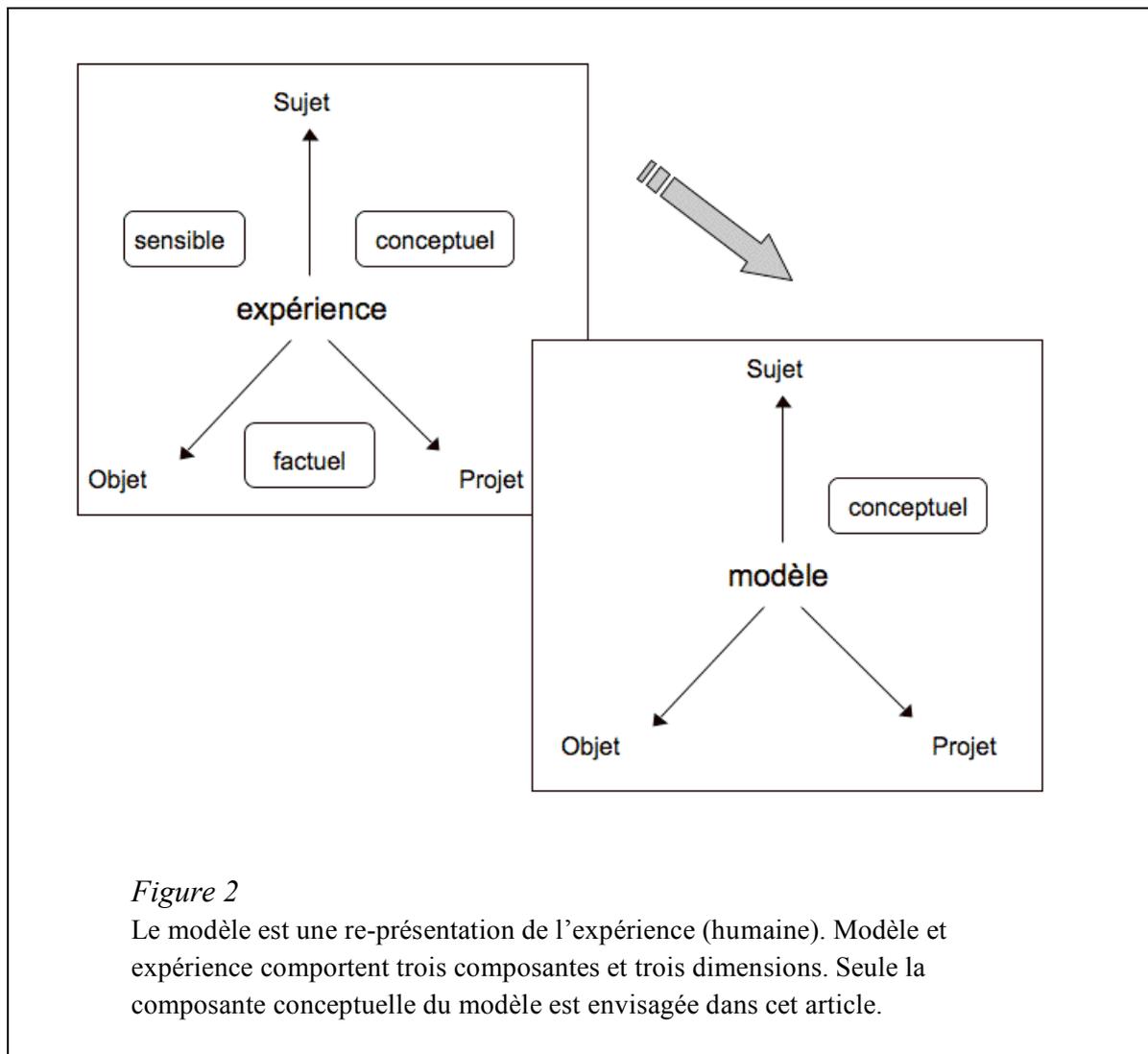
le choix de l'approche, son intégration dans un ensemble de situations, etc).

- Il est souvent constaté que les élèves ne font pas le lien entre la question de départ et le résultat d'une expérience de laboratoire (Hofstein et Lunetta 2003) ou d'une simulation (de Jong et van Joolingen 1998). L'élève retire essentiellement de son expérience un « savoir faire marcher une procédure, un programme », un « savoir comment ça marche ». Analysé avec la trialectique, il s'agit d'une réduction de l'expérience à sa composante *factuelle*. Cette réduction est caractérisée par une absence d'appropriation (voir la figure : l'axe *sujet* se trouve à l'opposé du plan *factuel*), de questionnement sur le « pourquoi » (la motivation du projet, l'intention, source de choix, de prise de position).

- Des études en didactique des sciences montrent qu'il n'est pas suffisant pour les élèves de toucher, voir ou entendre quelque chose, même en contradiction avec leur prédiction, pour faire évoluer leur compréhension de l'événement perçu (Tiberghien et al 2001 et références). Ceci peut aboutir à un échec dont on peut interpréter l'origine au regard de la trialectique : c'est une réduction de l'expérience vécue par l'élève à sa composante *sensible*. Cette réduction est caractérisée par une absence de projection (voir la figure : l'axe *projet* se trouve à l'opposé du plan *sensible*), de questionnement sur le « comment » (la planification, le contrôle, les objectifs de réalisation).

- Certains TP consistent à énoncer une relation, par exemple une loi de la mécanique, et demandent aux élèves de la vérifier dans un exemple, comme si cela suffisait pour déduire que la loi générale est vraie (Nott 1996, parle de « verificationisme »). L'élève aura du mal à évaluer le réalisme de ses résultats, leur validité ou leur représentativité expérimentale. Il va développer une vision abstraite du phénomène, un « savoir comment mettre en œuvre une analyse, un raisonnement ». Il s'agit d'une réduction de l'expérience vécue par l'étudiant à sa composante *mentale*. Cette réduction est caractérisée par une absence d'objectivation (voir la figure : l'axe *objet* se trouve à l'opposé du plan *mental*), de questionnement sur le « quoi » (les objets matériels, le contexte, les conditions, les contraintes).

La figure 2 montre les deux trialectiques, de l'expérience et du modèle. Le rapport d'homologie entre l'expérience d'un phénomène faite par un sujet et son modèle se définit par une combinaison entre une ou plusieurs composantes de la trialectique du modèle et une ou plusieurs composantes de la trialectique de l'expérience. Prenons un exemple pour illustrer ceci : une composante factuelle du phénomène biologique expérimenté (mise en évidence des faits) peut être re-présentée par une composante conceptuelle du modèle (mise en équations). Toute autre combinaison est possible. Le rapport expérience-modèle peut donc prendre de très nombreuses formes multipliées par la variété, d'une part des expériences possibles et, d'autre part, des modèles possibles (figure 2). Ainsi, croiser successivement une des trois composantes de l'expérience avec une des trois composantes du modèle donne neuf combinaisons. A cela s'ajoutent des combinaisons multiples : si l'on combine plusieurs composantes de l'expérience avec plusieurs composantes du modèle.



Un modèle formel tel qu'il est définis dans ce chapitre se caractérise principalement par sa composante conceptuelle, même si les autres composantes sont aussi présentes. Plus généralement, la composante conceptuelle du modèle peut être non seulement de nature formelle (e.g. une équation) mais aussi structurelle (e.g. un schéma) ou analogique (e.g. une métaphore).

Par ailleurs, un modèle qui se caractériserait principalement par sa composante factuelle serait, par exemple, un modèle réduit ou un prototype. Enfin, un exemple de modèle principalement défini par sa composante sensible est le modèle situationnel (mise en situation).

Dans ce chapitre, nous n'envisageons que la composante conceptuelle des modèles en biologie, c'est pourquoi seule cette composante a été indiquée sur la figure 2. Nous allons d'abord croiser la composante conceptuelle du modèle avec les trois composantes de l'expérience, une à une. Chacun de ses trois croisements donnera un type de modélisation (section 4). Cela signifie que nous chercherons à déterminer la fonction du modèle lorsque celui qui modélise a une expérience du phénomène biologique d'ordre

sensible ou factuelle, ou conceptuelle. Enfin, en intégrant les trois composantes de l'expérience, nous obtiendrons un quatrième type de modélisation.

## 5. Les fonctions du modèle

Les modèles sont envisagés ici dans des contextes où l'enseignant met l'étudiant en situation d'apprendre quelque chose sur un phénomène biologique et de résoudre un problème. Cela pose différentes questions auxquelles il faudra répondre : indépendamment du contexte de l'enseignement de la modélisation, que signifie expliquer, prédire, résoudre un problème avec un modèle ? quelles options pédagogiques choisir pour l'enseignement de la modélisation ?

Avant d'aller plus loin, précisons la place dans notre approche de cette notion centrale qu'est le problème (voir aussi à ce sujet Orange 2005). Dans le cadre théorique brièvement exploré précédemment, la notion d'expérience a été présentée dans ses trois dimensions : sa dimension sujet (pour la voir, il faut se centrer sur celui qui vit l'expérience), la dimension objet (pour la voir, il faut se centrer sur la mise en place de l'expérience, les conditions, le contexte, les ressources, etc), et la dimension projet qui résulte de la prise en compte des deux autres dans une tension créée par un problème. Un sujet se pose un problème à propos d'un objet et va s'engager dans un projet de résolution de ce qui fait problème, il va essayer de faire disparaître la tension. A la fin de cette section (section 5.4), je défends une certaine conception de l'apprentissage dans ce contexte : apprendre, c'est parcourir un chemin d'expériences, la résolution d'un problème faisant émerger chez le sujet de nouvelles questions, de nouvelles tensions. Ce chemin va être parcouru jusqu'à maîtriser cette compétence de résolution de ce qui fait problème (en l'occurrence, par la maîtrise des « re-présentations » que sont les modèles).

Comme annoncé plus haut, en étudiant le rapport expérience / modèle et en nous restreignant à quatre types de rapport, nous aboutissons à quatre fonctions du modèle (on se reportera au tableau pour un résumé), même si l'on pourrait affiner l'analyse et en trouver d'autres. Il est important de noter qu'un même modèle peut avoir plusieurs fonctions et que c'est sa fonction principale, la finalité première de la modélisation, qui est mise en avant dans chacun des quatre cas.

Composante de l'expérience	Fonction du modèle formel	Pédagogie : donner à...	Usage de la simulation	Outils de simulation
Factuelle, matérielle	« Calculer »	... faire	Calculer, produire et gérer des données	Applet, base de données
Conceptuelle, mentale	« Expliquer »	... expliquer	Programmer un modèle, générer différents modes de représentation	Programmation (Scilab), calcul formel (Maple), modélisation (Stella)
Sensible, affective	« Décrire »	... voir	Visualiser, simuler en temps réel, partager	Animation (automate cellulaire, Flash)
Intégration des trois composantes	« Indiquer »	... vivre	Mettre en scène une situation-problème	Un espace virtuel (Co-Lab, cité macropédagogique)

*Tableau 1.* Typologie des fonctions des modèles formels basée sur le rapport modèle/expérience (figure 2).

Dans certains cas, nous proposons (comme simple hypothèse, à ce stade de notre étude) l'option épistémologique de celui qui modélise. Puis, c'est l'activité de modélisation dans le contexte de l'enseignement universitaire qui est abordée, avec des éléments sur l'option pédagogique et des exemples d'usages des simulations dans ce contexte.

Faire le lien entre toutes les options citées par Weil-Barais et Lemeignan (1994 et section 2.3) est une entreprise ambitieuse qui n'est ici abordée que partiellement. Des études sur un contenu précis, des réalisations concrètes et des projets de recherche sont présentés dans le chapitre 3.

Je me contenterai pour le moment d'illustrer chaque fonction avec l'exemple de la croissance bactérienne. Ce thème a été choisi car il me permet de présenter une innovation pédagogique mise en place à Lyon 1, comme exemple de notre quatrième fonction, « pour indiquer », des modèles (section 5.4). De plus, on envisagera, pour chaque fonction des modèles, l'activité de modélisation dans le contexte d'une recherche appliquée, avec l'exemple de la percolation et des incendies de forêts (voir le chapitre 1, section 1.4 pour une introduction à la percolation) inspiré par un des Travaux Pratiques de l'UE présentée dans le document 1.

### **5.1 « Calculer » : un modèle pour trouver une solution quantitative et prédire quantitativement ce qui pourrait se passer.**

Le modèle de percolation comme modèle de la propagation des feux de forêt est utilisé ici pour calculer : des valeurs de paramètres, des corrélations entre paramètres,

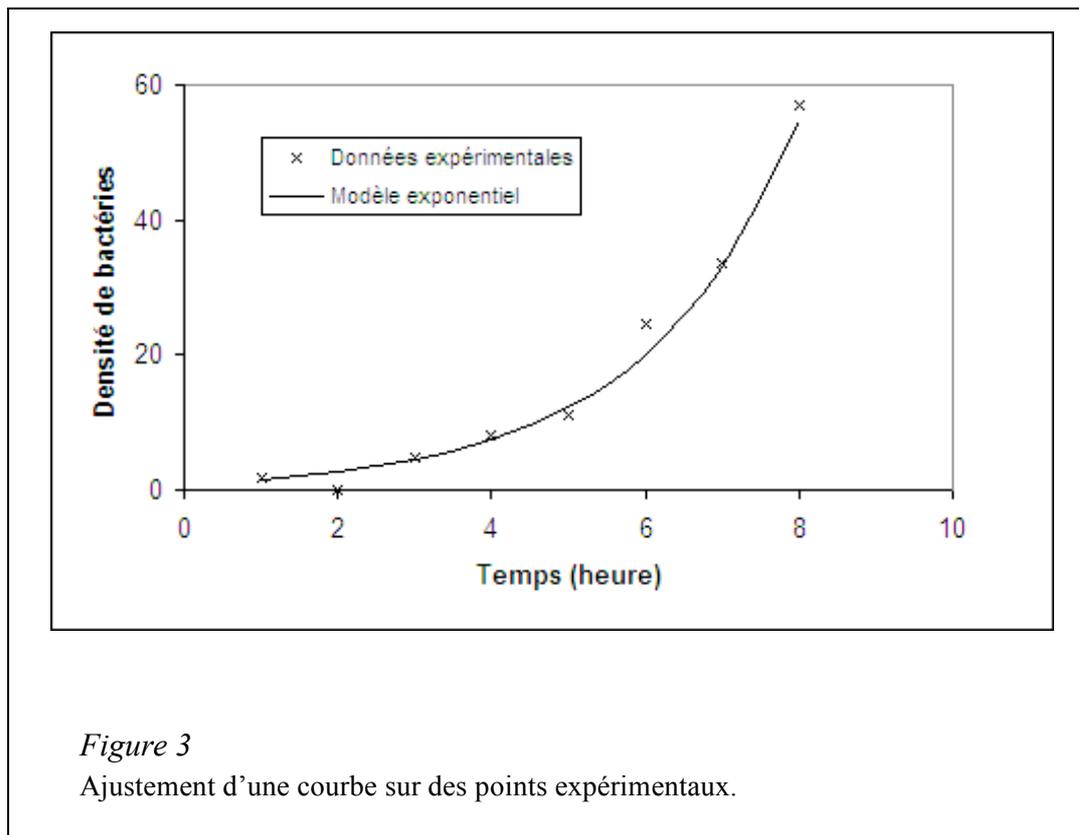
etc. Par exemple, il s'agit de calculer la densité d'arbres au-delà de laquelle le feu se propage, autrement dit la densité critique de percolation (voir chapitre 1, section 1.4). Dans cette approche de la modélisation, on peut concentrer ses efforts sur le développement de méthodes d'approximation pour calculer cette densité critique.

La fonction du modèle est de trouver une solution quantitative à un problème, que ce soit une évaluation ou une prédiction. Modéliser, ici, c'est opérer. On met au point des procédures, des méthodes de calcul et des modèles qui marchent. Ce type de modélisation privilégie la composante factuelle de l'expérience (figure 2) car l'accent est mis sur les faits, les opérations, le monde matériel et l'expérience concrète. On conçoit par exemple des protocoles d'expériences réelles ou simulées ayant pour but d'acquérir, stocker, extraire et extrapoler des données quantitatives.

Comment enseigne-t-on dans ce contexte ? A priori, l'option psychologique sur l'apprentissage la plus représentative me semble être le behaviorisme, la théorie du comportement (Lebrun, 2002). Un processus d'apprentissage privilégié est le conditionnement. Ainsi, l'activité pédagogique va donner l'occasion à l'apprenant, par la répétition, de s'exercer, s'entraîner ; elle va lui « donner à faire » et attendre une réponse précise à chacun de ses « stimuli ». Cette approche conduit souvent à des leçons très séquentielles illustrées par des questions fermées (Lebrun, 2002 ; Ney et al, 2005). Le modèle est plutôt utilisé comme une boîte noire : une simulation numérique, un logiciel de statistique ou un outil de calcul formel quand ils sont utilisés comme des calculateurs, des processeurs de données. M. Lebrun (2002) rapproche le behaviorisme du courant épistémologique de l'empirisme (e.g. C. Bernard dans Rumelhard, 1994), de par la primauté de l'expérience scientifique et des faits. Martinand et al. parlent d'un modèle qui se contente de postuler la relation reliant certaines « entrées » et certaines « sorties » de la boîte noire (1994, p.131).

La simulation permet de « rentrer » des valeurs et de regarder « ce qui sort ». La fonction principale de la simulation ici est de générer des données, des résultats quantitatifs. On peut déplorer que le mode de l'essai-erreur est bien souvent employé par les étudiants dans ces cas là (de Jong et van Joolingen 1998).

Prenons l'exemple de la croissance d'une population déjà évoqué dans la section 3, appliqué à une population de bactéries. L'apprenant recueille des données décrivant l'évolution dans le temps du nombre de bactéries dans des colonies (expérience que l'on peut faire au laboratoire) et son travail de modélisation consiste alors à rechercher des courbes de tendance, des fonctions-modèles pour chaque type d'évolution temporelle constatée. C'est le modèle d'hypothèse de la typologie des modèles-outils pour l'expérimentateur de J-M Legay (1997). Modéliser la croissance d'une population consiste à superposer des points expérimentaux et une fonction « au plus près » (figure 3) pour en déduire une vitesse de croissance, une prédiction sur le futur de cette population. Comme dans l'exemple de la percolation pour modéliser la propagation du feu, une activité centrale de modélisation est de déterminer les valeurs des paramètres du modèle à partir du calcul et des données expérimentales.



Nous venons donc de croiser la composante factuelle de l'expérience avec la composante conceptuelle du modèle (figure 2). Si ce type de modélisation se pratique (voir l'exemple de la percolation), il peut toutefois poser certains problèmes dans un contexte pédagogique. La difficulté principale, si on se focalise exclusivement sur ce type de modélisation, est que l'étudiant perd facilement de vue l'intention qui sous-tend le modèle et se met rapidement en action (actions de type presser des boutons sous le mode essai-erreur, faire fonctionner la boîte noire), mais sans but. Il n'est pas l'auteur de l'activité, ni celui qui pose (qui s'approprie) le problème.

## 5.2 « Expliquer » : un modèle pour expliquer ce qui est ou ce qui se passe.

Le modèle de percolation explique que la propagation du feu en forêt est la conséquence de la répartition spatiale des arbres et de son caractère aléatoire, irrégulier. Le raisonnement qui conduit à cette explication part de l'hypothèse que l'on peut décrire cette répartition spatiale avec une probabilité de liens entre zones : la présence d'un lien autorise la propagation directe de l'incendie entre les deux zones favorables liées (chapitre 1). A partir de la densité de probabilité de zones favorables, on peut entre autre déterminer la probabilité de propagation du feu.

Dans ce cas, la fonction du modèle est d'établir un lien causal entre des lois, des formules et des phénomènes et ainsi d'offrir un cadre rationnel pour interpréter les faits qui ne sont eux-mêmes établis que dans ce cadre. Modéliser, ici, c'est expliquer par le raisonnement, c'est rechercher un mécanisme. C'est la conjugaison de la formule de

départ, du raisonnement logique et pour finir du résultat mathématique final qui « expliquent » le phénomène. Ce type de modélisation privilégie la composante mentale de l'expérience (figure 2), les idées, les concepts, les connaissances abstraites. Différentes représentations externes sont possibles. Elles font appel à un ou plusieurs registres sémiotiques (Duval, 1995) comme la langue maternelle, les représentations symboliques (e.g. les formules mathématiques), les représentations iconiques (e.g. les graphes, les schémas dynamiques) ou les tableaux. Les différentes représentations (externes) concourent à expliquer le phénomène ; elles aident le sujet à se forger une représentation mentale (interne) de ce phénomène. Une fonction centrale est donc ici la fonction de représentation : la mise en équations, en graphes, la mise en relation entre plusieurs représentations externes.

Apprendre à modéliser, dans ce contexte, pourrait se traduire dans une conception cognitiviste ou constructivisme de l'apprentissage, car on apprend par construction de connaissances nouvelles qui sont situées, dans une structure cognitive, par rapport aux connaissances antérieures. Selon M. Lebrun (2002), le courant épistémologique qui s'apparente le mieux au cognitivisme est le rationalisme. Il s'agit d'expliquer par le raisonnement, de construire des modèles à partir de structures cognitives déjà présentes chez l'étudiant.

L'activité pédagogique de modélisation donne à expliquer. L'apprenant est invité à expliquer ce qui se passe, à construire des représentations sous le mode formel des mathématiques. Les outils prototypiques sont les logiciels de calcul formel et les logiciels de modélisation qui demandent à l'étudiant placé dans un environnement proposé par le logiciel de construire et faire fonctionner son modèle. Les premiers, comme le logiciel *Maple*© par exemple, sont particulièrement bien adaptés pour créer différents modes de représentation (graphique, histogramme, numérique, formule, texte) et résoudre formellement des équations. Les seconds, comme le logiciel de modélisation *Stella*©, proposent une modélisation de type physico-chimique caractérisée par la séparation des facteurs et une approche déterministe des problèmes. « *Le modèle réside d'abord dans le choix des paramètres supposés pertinents, dans la sélection des paramètres que l'on peut négliger, dans les décisions concernant la façon de les faire varier ou les maintenir constants. Le modèle propose un mécanisme* » (Martinand, 1994). Il est probable que c'est le type de modèle que l'on retrouve le plus souvent dans l'enseignement de la modélisation à l'université (documents 1 à 4).

Dans l'exemple de la croissance d'une population de bactéries, on proposera aux apprenants de retrouver comme précédemment (section 5.1) la fonction-modèle, mais cette fois en la déduisant non pas des données mais d'un raisonnement explicatif : c'est parce que la population se reproduit qu'il y a un facteur de proportionnalité entre le taux de reproduction et la taille instantanée de la population. Ceci explique le mécanisme de croissance de la population (représenté par une équation différentielle du modèle exponentiel continu).

$$\frac{dN}{dt} = rN$$

La taille de la population de bactéries est notée  $N$ , le temps  $t$ . Le taux d'accroissement de cette population,  $r$ , est la différence entre le taux de natalité et la taux de mortalité.

C'est le modèle de mécanisme de J-M. Legay (section 2.3).

Nous venons cette fois de croiser la composante conceptuelle de l'expérience avec la composante conceptuelle du modèle (figure 1). Un écueil, si l'on se centre exclusivement sur ce type de modèle, est d'amener l'étudiant à confondre équation (ou plus généralement une représentation externe) et explication et à perdre le sens du modèle, ses conditions d'application, son lien avec les variables du problème. L'étudiant est capable de reconnaître le modèle et se contente d'expliquer les phénomènes par des automatismes explicatifs : « *c'est comme ça car c'est le modèle exponentiel* ».

### **5.3 « Décrire : un modèle pour reproduire ce qui se passe et/ou prédire qualitativement ce qui pourrait se passer.**

Une simulation, basée sur le modèle de percolation, est utilisée pour illustrer de manière la plus directe possible (en l'occurrence sur une grille bidimensionnelle qui offre une vue d'avion) la propagation du feu (chapitre 1, figure 4) et les patterns de propagation (proche en proche, ou blocs). Des méthodes de visualisation et d'analyse graphique des patterns (par exemple du degré d'agrégation) sont développées. On intégrera dans le modèle différents types d'interactions entre les arbres (e.g. la taille du voisinage de combustion) pour constater des changements de patterns. Le chercheur développe des simulations individu-centrées ou orientées-agent qui ne sont pas tant des calculateurs résolvant des équations du modèle, que des « *scénarios virtuels tendant à mimer un aspect complexe du réel, dans ses différentes dimensions, spatiales et temporelles* » (Varenne, 2005).

La fonction du modèle, ici, est avant tout de simuler : rejouer, reproduire pour obtenir la meilleure description des phénomènes. Modéliser, dans ce cas, c'est reproduire, décrire, réaliser une image fidèle du phénomène. Plus que d'expliquer ou d'agir, il s'agit avant tout d'observer. Ce type de modélisation privilégie la composante sensible de l'expérience et les interactions sujet-objet (figure 2). La visualisation comme outil de représentation et de dialogue a une place importante dans le processus de modélisation. Le modèle peut être conceptuel (de Jong & van Joolingen, 1998 et section 1) mais le concept n'est pas justifié en soi (comme dans le modèle explicatif). C'est la relation ou un ensemble de relations entre les concepts qui construit le modèle.

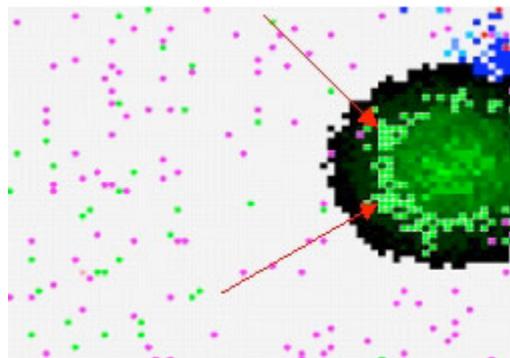
Cette approche de la modélisation pourrait s'apparenter à certains courants

épistémologiques comme le naturalisme. On cherche à faire des typologies, à repérer des propriétés homogènes, à trouver des indicateurs de ces types. L'accumulation des observations, du savoir, peut être un but en soi. Il n'y a pas vraiment « à comprendre ou expliquer ou rechercher des relations causales mais à accumuler les connaissances comme un trésor » (Rumelhard, 1994). Dans une option naturaliste, on nomme, décrit, classe et organise.

Comment enseigne-t-on avec ce type de modèles ? L'activité pédagogique « donne à voir ». Il est important d'être exhaustif, de faire un tour aussi complet que possible du phénomène (de constituer ou consulter des bases de données par exemple) et d'imiter la réalité au plus près. L'objectif est de décrire une masse d'observations.

L'outil privilégié est une forme de simulation qui propose un déroulement « sous nos yeux » du phénomène, en temps réel. Ce type de simulation se présente par exemple sous la forme d'une animation (voir Tversky et al. 2002 pour une comparaison animations/simulations et Chomat et al. 1992 pour un exemple d'enseignement à l'aide d'une animation).

Dans l'exemple des bactéries, on va représenter chaque bactérie par un point et observer la dynamique de ces points à l'écran. Tout est «comme si» on observait les organismes réels au laboratoire. Il s'agit d'observer l'évolution et la forme des colonies de bactéries, en présence d'antibiotique par exemple (figure 4).



*Figure 4*

Simulation. La colonie de bactéries en train de croître au cours du temps et la croissance est régulée par un antibiotique. Les flèches indiquent une zone où les bactéries sont attaquées par l'antibiotique (source : Kerr 2005).

Cette fonction du modèle est le résultat d'un croisement entre la composante sensible de l'expérience et la composante conceptuelle du modèle (figure 2). Le problème, si on se focalise sur ce type de modèle uniquement, est que les étudiants ne voient pas qu'ils sont guidés dans leurs observations. L'approche privilégiée est inductive et amène les étudiants à passer de l'observation du cas particulier au principe général. Il est tentant de

confondre cette simulation, cette reproduction au plus près de la réalité, avec une explication.

#### **5.4 « Indiquer » : un modèle pour s’orienter, comprendre, décider et prédire le sens des choses, des phénomènes.**

Le modèle de propagation des incendies est inscrit dans un contexte social et décisionnel. C’est un modèle fait pour être compris, interprété et utilisé. Ce travail constituera à lui seul une réalité combinant réflexion théorique, actions de terrain et dialogue entre partenaires. Le modèle est, par exemple, un outil d’aide à la décision et d’accompagnement de projets d’aménagement et de prévention des incendies de forêt qui intègre les 3 dimensions de l’expérience (section 4) :

- une intention (e.g. surveiller et prévenir les feux, évaluer des risques, protéger ou restaurer des populations, planifier et aménager le territoire ...)
- des objets, des conditions (contexte humain et écologique, statistiques des incendies de forêt, paramètres de la dynamique de propagation du feu, facteurs de déclenchement du feu...),
- un projet de modélisation (objectifs de réalisation, acquis, développement, contrôles, transferts...).

La fonction du modèle, dans ce cas, est de soutenir une intention et d'envisager des décisions (c'est bien dans cette optique que l'on a besoin de modéliser les incendies de forêt). Le lien avec l'expérimentation de terrain, la problématique, est essentiel (contrairement au modèle explicatif précédent qui, s'il se base éventuellement sur des données, ne prend pas en compte le contexte, l'expérience du phénomène de celui qui modélise étant essentiellement d'ordre mentale). Modéliser, ici, c'est indiquer une direction et donner du Sens (section 4). Le langage mathématique va permettre à celui qui est engagé dans une problématique biologique d'être plus compétent dans ses jugements (prendre des décisions) et dans sa capacité d'utiliser son imagination (enrichir ses représentations, faire face à des problèmes non standard). Ce type de modélisation intègre les trois composantes (figure 2), factuelle, sensible et mentale de toute expérience humaine. Le langage des mathématiques permet une représentation rigoureuse et formelle de l'expérience mentale, une modélisation efficace de l'expérience pratique, et est aussi un véhicule de l'expérience relationnelle et sensible. Ce n'est pas le résultat final qui est à enregistrer comme un savoir mais la représentation symbolique véhiculée par le modèle qui permettra à d'autres personnes de trouver un chemin de maîtrise (conjuguant connaissance et compétence) dans le domaine.

L'activité pédagogique « donne à vivre », cette fois. On ne peut pas se contenter de demander de résoudre une équation, de décrire le modèle ou de suivre une recette (des statistiques par exemple). L'activité est personnalisée pour permettre une internalisation

par chaque étudiant des connaissances tout au long du parcours pédagogique proposé. Elle donne une grande place à la démarche de modélisation au lieu d'être centrée exclusivement sur le contenu et les résultats. Des parcours de ce type sont peut-être difficiles à mettre en place dans une approche universitaire traditionnelle (cours/TD) tandis qu'ils bénéficient pleinement des approches par apprentissage actif, comme par exemple l'apprentissage par problème (APP), l'apprentissage expérientiel, ou bien encore l'apprentissage par investigation. Ces trois approches ont en commun de proposer aux étudiants une quête, une mission, de se confronter à l'inconnu, avec des phases d'apprentissage alternant le travail en groupe et le travail individuel et incluant la problématisation, la recherche ouverte d'information, la familiarisation avec le problème et ses objets, la prise d'initiative et de décision... Il s'agit de proposer des activités permettant à l'apprenant de trouver son chemin propre et non de l'obliger à passer par des étapes fixées conduisant à un résultat prédéfini et unique.

L'ordinateur et Internet peuvent aider l'enseignant à mettre en scène l'activité et à mettre l'apprenant en situation, mais ce dernier gardera une responsabilité dans la construction de cette situation. Des scènes virtuelles sont réalisées par les enseignants et les concepteurs. Voyons-en deux exemples, tous deux étant des environnements d'apprentissage recréant des phénomènes biologiques ou physiques dans la classe à l'aide de substituts technologiques. Un exemple est basé sur les modèles de dynamique de population (Moher<sup>3</sup> 2006) et un autre sur les probabilités (Cerruli et al<sup>4</sup> 2005). Dans les deux cas, il s'agit d'activités proposées à des élèves en fin de primaire ou début de collège (cependant, on peut en imaginer une transposition à d'autres niveaux scolaires).

---

<sup>3</sup> Les différents projets de Tom Moher sont décrits sur <http://www.evl.uic.edu/moher/>

<sup>4</sup> Projet WebLab, voir <http://www.lkl.ac.uk/kscope/Weblabs/>

## Exemple 1

Une salle de classe (aux Etats-Unis, piloté par le Electronic Visualisation Laboratory, Chicago) est censée abriter des centaines d'insectes (Barron et al, 2006) : sept populations de sept espèces différentes ayant des interactions de type proie/prédateur ou de type compétiteurs pour les ressources. On ne les voit jamais (et pour cause, ils n'existent pas) mais on peut détecter la trace d'insectes individuels sur des pièges disposés dans la classe. Le problème est de trouver les conditions qui permettent d'attirer les bons insectes et se débarrasser des autres (les bons et les mauvais insectes étant définis dans un article de journal censé être écrit par des agriculteurs locaux).



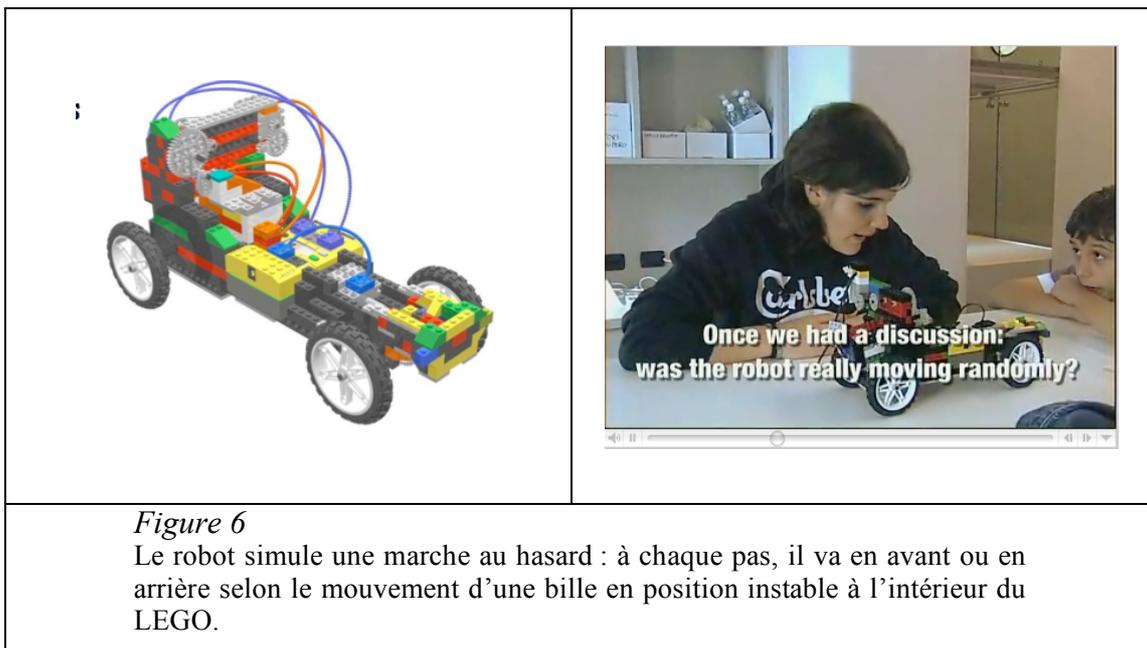
*Figure 5*

Les élèves font une inspection régulière des traces laissées par les insectes et utilise le stylo pour marquer les traces et les compter.

L'expérience dure plusieurs semaines. La scène est posée. Chaque groupe d'élèves va choisir ensuite de s'intéresser à certains aspects ce problème (la prédation a attiré particulièrement les groupes de garçons), construire son propre projet. Le modèle de dynamique des populations de la simulation n'est pas visible, mais les élèves connaissent les concepts (compétition, migration, prédation etc) permettant d'organiser une récolte de données et leur interprétation. En effet, les élèves doivent décider des données qui leur permettront d'identifier les populations, leurs interactions et leur densité. De plus, les événements ne sont pas prévisibles car ils dépendent de l'interaction entre les élèves et les insectes : ils peuvent faire varier quelques paramètres (comme le degré d'humidité ou le type et la quantité de pesticides). Les élèves se déplacent donc physiquement dans leur espace d'expérience (la classe) et cette expérience sensible et factuelle est combinée avec une expérience mentale, avec des activités plus axées sur les concepts, comme la construction d'un protocole expérimental, la représentation des données, l'analyse et la communication des résultats (dans des articles du journal de classe).

## Exemple 2

Quand peut-on dire qu'un phénomène est aléatoire ? qu'est-ce que c'est ? Une activité pour répondre à ces questions a été conçue par des chercheurs de l'Institute of Educational Technologies, à Gènes en Italie (Cerulli et al 2005). Elle est divisée en quatre étapes que les élèves vont visiter, en cycles, alternant des expériences phénoménologiques, des activités de verbalisation et des activités de socialisation. Les élèves commencent par une activité leur permettant de mobiliser des connaissances à propos du hasard. Ils tentent de le définir à partir de leur intuitions, de leur expérience de tous les jours ; ils en discutent. Dans une étape suivante, les élèves s'engagent dans une activité concrète leur faisant « vivre » le phénomène de hasard. Il s'agit de faire fonctionner et observer un robot LEGO qui marche au hasard (un concept qui est utilisé en sciences expérimentales, par exemple pour modéliser le déplacement du bourdon de fleurs en fleurs, le modèle « random search », voir section 2.3).



Dans l'étape suivante, un modèle de marche au hasard est programmé par les élèves à l'aide d'un micro-monde de programmation graphique (ne demandant pas de connaître un langage de programmation). En comparant avec le robot, ils tentent de créer et discriminer des mouvements au hasard (de plusieurs types) et des mouvements qui ne le sont pas. Une dernière étape consiste à structurer leurs résultats en construisant de manière collaborative une « Webpedia » (une encyclopédie sur le *Web*). Ils vont aussi présenter leur projet au public, lors d'une fête de la science. Plusieurs composantes essentielles de toute expérience sont présentes dans cet exemple :

- (1) Un temps pour interagir, pour mobiliser des expériences passées, pour explorer (mise en avant de la composante sensible).
- (2) Un temps pour « voir ce qui se passe si », collecter des données, des faits (mise en avant de la composante factuelle).
- (3) Un temps pour conceptualiser, avec les modèles mathématiques ou informatiques disponibles (mise en avant de la composante conceptuelle).
- (4) Un temps pour appliquer les connaissances acquises dans un nouveau projet, dans un contexte social.

Sur le thème de la croissance d'une population de bactéries, décliné dans toute cette section, une innovation pédagogique a été mise en oeuvre à Lyon 1 (Ney *et al.*, 2004) et fait toujours partie d'une UE de licence 1 à ce jour. Les étudiants suivent un apprentissage par problème (APP) et travaillent sur deux situations-problèmes successivement sur un semestre. L'une d'entre elles est la suivante (voir aussi la figure 7) :

### **Bio-capteurs de bactéries**

Dans le domaine de la conservation des aliments, le respect de la chaîne du froid est capital pour éviter tout risque de contamination des aliments par des bactéries pathogènes.

En 2001, Renaud Vaillant, un étudiant lyonnais de l'école centrale, a eu l'idée d'un bio-capteur qui permette de détecter si un produit alimentaire est resté convenablement réfrigéré. Si ce n'est pas le cas, le code barre sur l'emballage s'obscurcit et le produit ne peut plus passer en caisse.

L'idée de cet étudiant a été de mettre un substrat contenant des micro-organismes sur le film d'emballage du produit. Ces organismes se multiplient rapidement s'ils sont à température ambiante et induisent alors le changement de couleur du bio-capteur. Le nombre de bactéries dans le bio-capteurs est un indicateur de l'état sanitaire du produit.

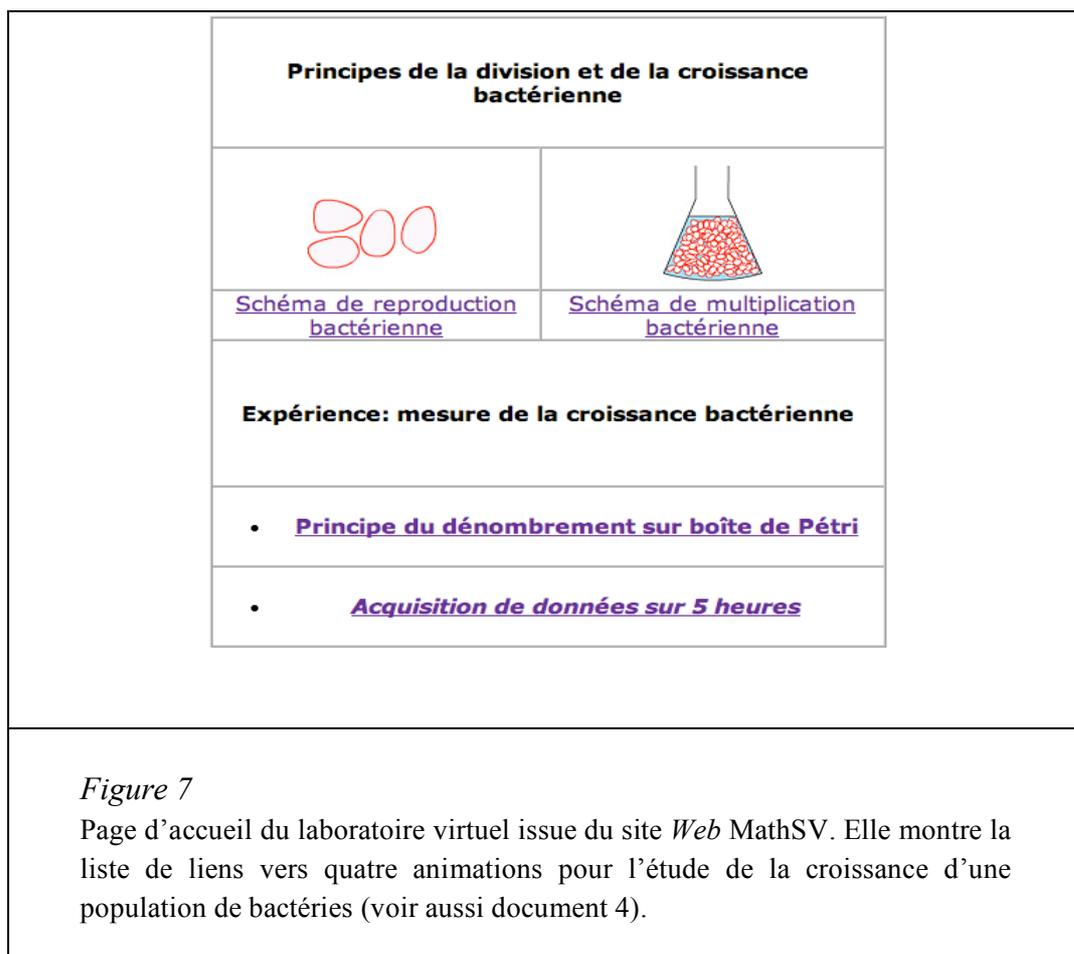
Le service biotechnologies d'une entreprise d'agro-alimentaire a décidé d'adapter ce système à leur gamme de produits. L'entreprise a déjà mis au point un bio-capteur qui contient au départ 100 bactéries et qui change de couleur à partir de 5500 bactéries. Leurs produits ne doivent pas être exposés à température ambiante (25°C) pendant plus de 10h.

Dans ce cadre, votre mission consiste à proposer un modèle permettant de choisir la ou les bactéries adéquates. Comme d'autres applications pourront être envisagées, il vous est demandé d'être le plus général possible.

Pour vous aider dans votre tâche, vous disposez (sur le site <http://mathsv.univ-lyon1.fr>) de :

- quatre bactéries pour faire des expériences (sur 5 ou 30 heures) dans le laboratoire virtuel.
- une liste de 20 autres bactéries avec leurs caractéristiques.

Ils disposent pour cela d'une séance de Travaux Tutorés hebdomadaire en présentiel, encadrée par un tuteur, et d'une aide méthodologique, un guide pour travailler en groupe (de 4 ou 5 étudiants) suivant les phases classiques d'une APP. De plus, ils ont accès à un laboratoire virtuel (une animation développée en flash permettant de recueillir des données, figure 7) et à un ensemble d'aides conceptuelles (cours et exercices en ligne sur le site Web MathSV). Cette innovation, les choix pédagogiques, le contexte et les recherches qui ont suivi seront présentés plus en détail dans le chapitre suivant.



Dans cet exemple, l'intégration des trois composantes, sensible, factuelle et mentale se fait au travers du problème et de la situation des travaux tutorés. L'étudiant ne se contente plus de réfléchir ou s'exercer et chercher les solutions prédéterminées par l'enseignant. Il doit s'organiser pour travailler en groupe, prendre des initiatives et des décisions, s'exprimer sur ses idées et ses résultats. Son but est la réussite du projet en suivant la stratégie de résolution du problème adoptée par le groupe.

## 6. Conclusion : évaluation de la typologie et propositions pour l'enseignement de la modélisation

La typologie des fonctions des modèles peut être utilisée à double titre. Par l'enseignant qui veut initier ses étudiants à la modélisation en biologie et qui pourra faire fonctionner les modèles d'une manière ou d'une autre en connaissance de cause. Pour le chercheur en didactique, la typologie demande d'être évaluée. Trois critères

d'évaluation sont proposés par De Vries (2001), celui de nécessité, d'exhaustivité et d'exclusivité que nous reformulons un peu différemment comme des critères de relevance (nécessité), de cohérence (exhaustivité et exclusivité) et de performance.

Pour tester si les quatre fonctions sont pertinentes nous avons cherché des points de recouvrement avec des types de fonctions des modèles décrits dans la littérature (au moins pour les modèles selon Legay, 1973, 1997). Les quatre fonctions sont cohérentes dans la mesure où elles sont basées sur le rapport expérience/modèle (modèle formel ici) et où les trois composantes de toute expérience ont été envisagées. La dernière fonction du modèle est basée sur une intégration des trois composantes. Cependant, certains modèles et certaines simulations pourront remplir plusieurs fonctions selon l'usage qui en est fait, on a pu le constater avec les deux exemples qui sont déclinés dans les quatre fonctions (la percolation et la démographie). Ce ne sont pas les modèles qui sont par leur nature d'un type ou d'un autre mais la fonction qu'ils prennent pour l'utilisateur en situation de résoudre un problème par la modélisation. Enfin, la performance de cette typologie devra être mesurée par rapport à la proposition suivante. Il faut prendre en compte les trois composantes de l'expérience : factuelle (matérielle), sensible (affective) et mentale (conceptuelle) dans la mise en place de supports et de méthodes pédagogiques pour l'enseignement de la modélisation en sciences expérimentales (biologiques).

Cette typologie a la particularité d'être basée sur une théorie (dont la pertinence pour la didactique des sciences reste certes à démontrer) plutôt que sur une approche empirique. Cependant, un lien pourrait être établi entre les fonctions des modèles présentées ici et d'autres catégorisations. Celle de Lebrun présente un certain nombre de congruences avec la nôtre et la complète par des associations entre option épistémologique, option psychologique et option pédagogique. Nous sommes partis du postulat que ces options, ces points de vue, influencent la façon dont sont utilisés les modèles et les simulations (Hilborn & Mangel, 1996 ; Lebrun, 2002). Nous devons faire trois remarques importantes à ce propos. Tout d'abord ces options théoriques (constructivisme, béhaviorisme, etc.) sont présentées sous une forme qui peut paraître caricaturale. De plus, un point de vue théorique ne commande pas de façon déterministe la conception des fonctions pédagogiques du modèle ou de la simulation (De Vries, 2001), mais, toutefois, celles-ci peuvent être vues comme une implémentation d'un point de vue théorique sur l'apprentissage, qu'il soit implicite ou explicite. Enfin, ni toutes les théories de l'apprentissage ni toutes les postures épistémologiques n'ont été citées. Il serait intéressant d'étudier la nature des modèles selon les différents courants épistémologiques, idéalisme/réalisme, empirisme/rationalisme, universalisme/relativisme (d'Espagnat 1979, Chalmers 1987, Darley 1994).

Comment apprend-on à modéliser, à se servir des modèles ? Cela dépend de ce que l'on entend par apprendre. De plus, il est certain que les étudiants qui arrivent à l'université ne construisent pas des modèles mais les adaptent, les manipulent. Les enseignements de modélisation en biologie sont exceptionnels au niveau de la licence.

La tendance est de se contenter de résoudre des systèmes d'équations et d'interpréter les solutions (une gymnastique certes nécessaire pour ceux qui voudront aller plus loin). Dans ce cas, il est possible de remplacer avantageusement l'expérience vécue d'un problème réel, issu de l'expérimentation de laboratoire ou du monde professionnel, par des activités sur des représentations théoriques ou des simulations. En effet, les composantes factuelles et sensibles de l'expérience (de celui qui s'approprie le problème puis le modélise) sont négligeables dans cette optique. Dans ce chapitre, nous soulignons que toute expérience (humaine) comporte les trois composantes et que nier l'une ou l'autre peut conduire à des difficultés pour l'étudiant. Nous proposons une fonction « indiquer » des modèles qui intègre les trois composantes de l'expérience. Nous proposons une pédagogie expérientielle (Kolb, 1984). Une innovation pédagogique a été présentée brièvement (on en trouvera une présentation plus détaillée dans Ney *et al.*, 2004 et au chapitre 3). Nous préconisons donc de s'assurer de l'intégration de toutes les composantes de l'expérience et, en particulier, de redonner sa place à l'expérience qui ne soit pas purement mentale (manipuler des paramètres dans une simulation) mais située (dans ce cas : partir d'une situation inconnue, planifier une expérience, prendre des décisions concrètes) et à l'interaction sensible (manipuler des objets, se motiver grâce au travail entre pairs).

## Chapitre 3

### Apprentissage expérientiel de la modélisation en sciences expérimentales



**Objectif :** choisir une option sur l'apprentissage et présenter un projet de recherche récent sur l'apprentissage et l'enseignement des mathématiques pour les sciences de la vie.

**Résumé :** La problématique de la cohérence entre le sens de l'apprentissage et l'usage des technologies est soulevée. L'élaboration d'un outil original est présenté. Il permettra de discerner différentes postures possibles pour l'enseignant en situation de concevoir une *expérience pédagogique*. Ensuite, un projet d'enseignement et de recherche sur les outils mathématiques pour les sciences de la vie est présenté. Le contexte, les objectifs pédagogiques, l'environnement informatique et les résultats d'une recherche expérimentale en conditions écologiques seront décrits.

## 1. Introduction

Le type d'apprentissage auquel je m'intéresse, et dans lequel je vais inscrire mes projets de recherche, est l'apprentissage expérientiel (introduit au chapitre 2, voir aussi Balleux, 2000, pour une thèse sur le sujet et Dewey, 1938, considéré comme un des pères de ce type d'apprentissage). Ce terme n'a pas le même sens selon les auteurs : cela peut aller de l'apprentissage par les cinq sens à l'apprentissage dans le contexte professionnel. Pour nous, il s'agira de la prise en compte par l'enseignant de toute la richesse de l'expérience vécue par la personne qui apprend (que la source de cette expérience soit dans la dynamique du groupe, dans des activités pratiques ou bien formelles). Parmi les différents points de vue possibles sur l'apprentissage expérientiel, c'est celui de l'épistémologie et de la didactique que nous prendrons, pour nous intéresser à la problématique du rapport entre savoir et expérience vécue dans l'apprentissage.

Du côté des savoirs, il s'agit de ceux en jeu dans un enseignement de la modélisation formelle en sciences expérimentales. Prenons un exemple déjà évoqué au chapitre 1 (section 1.3) et qui sera repris plus loin : les approches statistiques enseignées aux biologistes et les savoirs associés (section 3.2). Prendre le point de vue des savoirs sur l'apprentissage expérientiel, c'est se poser de multiples questions : En quoi faire fonctionner les modèles statistiques témoigne-t-il d'une expérience humaine ? Quel est le cheminement expérientiel (et pas seulement mental) de l'apprenant en situation de découvrir et comprendre la variabilité statistique du vivant ? Comment individualiser ce cheminement ? Comment utiliser les technologies et les environnements informatiques comme vecteur de l'expérience pédagogique vécue par l'apprenant, comme « paysage » dans lequel l'apprenant chemine ?

### **A propos de l'expérience.**

Dans ce chapitre, nous allons nous intéresser à l'*expérience* pédagogique. Il ne s'agit pas de l'*expérience* scientifique du chercheur en didactique, ni d'une *expérience* à caractère exceptionnelle de l'enseignant innovateur. Il s'agit de l'*expérience* telle qu'elle est donnée à vivre par l'enseignant à ses étudiants. Ayant une *expérience* au niveau universitaire, j'emploie le terme étudiant, même si le terme élève pourrait être utilisé de la même façon. Dans ces quelques lignes, le mot *expérience* est volontairement employé dans des sens différents : l'objet de ce préambule est de mettre en lumière ces différents sens.

Nous allons commencer par une petite histoire imaginaire sur le tir à l'arc, en trois parties. Cette image peut être vue comme une figure de toute autre pratique d'un art, et d'une science, et de l'enseignement de cet art ou de cette science.

« J'aime bien faire des expériences et cet été j'ai fait une séance de tir à l'arc. »

J'ai vécu cette expérience comme elle venait, j'en garde des souvenirs, mais pas forcément des connaissances (à moins de me mettre ultérieurement à re-présenter cette expérience par un modèle, verbal, formel ou autre).



« J'ai tiré sur une cible de plus en plus éloignée ; j'ai expérimenté plusieurs angles de départ de ma flèche en fonction de la distance qui me séparait de la cible. »

Je m'aide d'un modèle du tir à l'arc : je sais que je peux contrôler l'angle si j'augmente la distance entre moi et la cible, pour l'atteindre. Je suis en train de re-présenter le modèle par l'expérience du tir que je fais.



« Mon professeur avait une grande expérience du tir à l'arc. »

Il atteint sa cible à tous les coups. Il « comprend » le tir à l'arc. Il possède à la fois une maîtrise de soi (quand il tient l'arc), une technique, une représentation du mouvement de la flèche, et une capacité à faire coïncider son intention (matérialisée par la position de l'arc, dimension sujet), son objet d'attention (le point cible, dimension objet) et la réalisation du tir (l'action qui consiste à tirer la flèche, dimension projet) (Nifle, 1986).

E. Herrigel (1936/1998) raconte dans son livre sur l'art zen du tir à l'arc que la tradition (et son expérience) lui ont appris que c'est dans le « lâcher prise » que s'exerce la maîtrise et non dans une tentative de coordonner différents facteurs de maîtrise. Lorsque l'on parle de quelqu'un d'expérimenté, qui a de l'expérience, cela peut faire référence à différents degrés de maîtrise qui restent à éclaircir : depuis la simple capacité de répétition, acquise par un usage prolongé, à la véritable maîtrise du lâcher prise.

On peut distinguer dans ces trois parties de l'histoire, trois niveaux d'expérience que nous allons qualifier à l'aide de l'approche de R. Nifle (1986) :

1. L'expérience, « réalité actualisée » : expérience immédiate qui se traduit par l'avènement de la réalité. C'est en général ce que l'on entend par « expérience vécue », l'effet que nous fait cette réalité.
2. L'expérience, « réalité re-présentée » (voir aussi le chapitre 2, section 4) : expérience comme réalisation de son rapport aux choses, comme mise à l'épreuve. Un exemple est l'expérience scientifique.
3. L'expérience, « réalité maîtrisée » : au-delà des formes précédentes, il s'agit de la maîtrise du Sens (chapitre 2), la capacité à discerner tous les sens possibles, choisir et tenir une position puis la traduire en pratique (nous en reparlerons plus loin, chapitre 3 - section 2.2).

G. Bastide (cité dans Coquidé 2003, p12) distingue aussi trois sens correspondant à « trois exigences de la conscience dans son travail de maturation » et qui semblent proches des trois précédents :

1. Expérience vécue : « *connaissance subjective ressentie d'une manière d'être qualitative et intensive, dont le caractère unique interdit l'interchangeabilité des sujets.* »
2. Expérimenter : « *recours décisif destiné à soumettre une hypothèse à l'épreuve de sa réalisation pratique* » et « *expérimentation scientifique* ».
3. Expérience : « *un processus temporel, et même historique, d'intégration. Par ce processus, les expériences, aux deux sens précédents d'expérimentation et d'expérimentation, sont assimilés par le sujet pour composer sa propre substance.* »

Par ailleurs, on peut distinguer l'expérience volontaire, provoquée, de l'expérience involontaire, déclenchée sans but conscient d'acquisition, d'analyse ou d'évaluation. Une personne peut préparer une expérience scientifique - mettre en évidence la trajectoire parabolique de la flèche, prédite par les lois de la mécanique classique - en se

basant sur ses propres expériences passées (quand je jette un objet en avant, il finit par tomber après avoir suivis une trajectoire courbe). Ces expériences passées sont involontaires par rapport à la question, dans le sens où elle n'ont pas été faite dans le but de mettre en évidence une trajectoire parabolique... Une expérience (jeter des objets) se définit comme volontaire ou involontaire, pour un sujet, par rapport à un projet (analyser des trajectoires de projectiles).

Dans la suite, nous envisagerons l'expérience dans un contexte particulier, à savoir celui de l'apprentissage ; nous parlerons de l'expérience qui est donnée à vivre par l'enseignant à des étudiants :

Une *expérience pédagogique*<sup>1</sup> : dispositif et procédés mis en place pour l'apprentissage, c'est-à-dire l'appropriation par l'étudiant de nouvelles capacités.

Cette formulation générale ne prend parti pour aucun courant pédagogique, si ce n'est qu'elle met en avant l'importance de l'appropriation par l'étudiant. On peut donc entendre les termes « apprentissage », « dispositif » et « procédés » dans différents sens.

Selon les objectifs pédagogiques, l'enseignant peut organiser pour les étudiants une expérience au niveau 1 ou 2, c'est-à-dire une expérience d'actualisation ou de représentation, ou bien il peut avoir une finalité plus élevée (niveau 3), celle d'emmener les étudiants sur un chemin de maîtrise. Le fait que l'expérience soit volontaire ou non pour l'étudiant, au sens ci-dessus, va dépendre de son appropriation, son implication dans le « projet » (le projet étant défini par la finalité de la séance du jour ou du module entier, par exemple).

Dans une vision assez proche, Dewey (1938) définit ce qu'il appelle une « expérience éducative » par opposition à une expérience qui ne le serait pas. Il introduit le concept de continuité (les enseignants doivent prendre en compte que l'expérience des étudiants vécue sur le moment est unique et est profondément influencée par les expériences du passé) et le concept d'interaction sujet-objet.

---

<sup>1</sup> en référence à cette définition, cette expression sera en italique dans ce chapitre.

## 2. Quel rôle pour les technologies de l'éducation ? Quelle éducation ?

*« S'interroger sur les technologies ./.../ est une question lourde de présupposés qui renvoie à des interrogations antécédentes et fondamentales. Parler de l'efficacité d'un outil pédagogique nécessite de se référer aux méthodes dans lesquelles cet outil prendra place et plus loin encore aux objectifs éducatifs qu'ils sous-tendent. » (Lebrun 2002).*

Faisons un parallèle entre enseigner et cuisiner sur la question de l'adéquation entre outils et objectifs. En cuisine, qui contredira le fait qu'il faut bien plus qu'une bonne recette et de bons ustensiles pour aboutir à ses fins ? Au fait ... quels fins ? Se nourrir ou se réunir ? se souvenir ou s'étonner ? La qualité de l'expérience vécue dans le repas, comme dans la classe, tient entre autres à l'adéquation entre les besoins de celui qui reçoit et ce qu'il reçoit. Ni les ustensiles (ordinateur, pda, vidéoprojecteur, etc), ni les recettes (les « bonnes pratiques » d'enseignement) ne vont, automatiquement, rendre meilleure l'expérience de goûter la cuisine du chef ou d'apprendre en suivant l'enseignement du maître.

Revenons à l'enseignement. Les technologies peuvent contribuer à améliorer la qualité de l'expérience vécue par l'étudiant. A quelles fins ? C'est la première question que l'on doit se poser. Il y a évidemment plusieurs réponses possibles. En partant d'une analyse des finalités de l'expérience que fait vivre l'enseignant à ses étudiants, il sera possible de chercher une cohérence entre les objectifs didactiques, les méthodes pédagogiques et la médiation par les outils technologiques de ces objectifs et méthodes.

### 2.1 Nécessité d'un outil de discernement

*« On a longtemps cru que les ordinateurs pourraient remplacer les enseignants en programmant le questionnement socratique, comme dans l'enseignement assisté par ordinateur où la machine interroge l'élève et adapte les questions posées aux réponses obtenues. On a aussi cru l'inverse, à savoir que des micromondes (Logo) ou le monde tout court (Internet) fourniraient des environnements suffisamment riches pour que l'élève se pose spontanément les bonnes questions et découvre, avec ou sans l'aide du maître, les bonnes réponses. Mais ces deux utopies sont trop schématiques pour épuiser la complexité pédagogique. » (Maulini, 2001)*

De nombreux auteurs, écrivant sur l'intégration des technologies éducatives dans l'enseignement et la formation, se basent sur une vision avec deux pôles opposés : par

exemple, un ouvrage de J. Tardif (département de pédagogie, université de Sherbrook) et le rapport d'activité de l'équipe européenne ReCré@Sup (projet européen Minerva) coordonnée par B. Charlier et A. Daele (département éducation et technologies, université de Namur).

J. Tardif (1998) a proposé un cadre pédagogique pour l'intégration des Technologies. Il évoque « *l'avènement d'un paradigme inédit, le paradigme de l'apprentissage, qui se situe en relation d'opposition par rapport au paradigme prédominant dans les écoles actuelles, le paradigme d'enseignement.* » Il résume ce point de vue dans le tableau suivant<sup>2</sup> (Tardif, 1998, p35) :

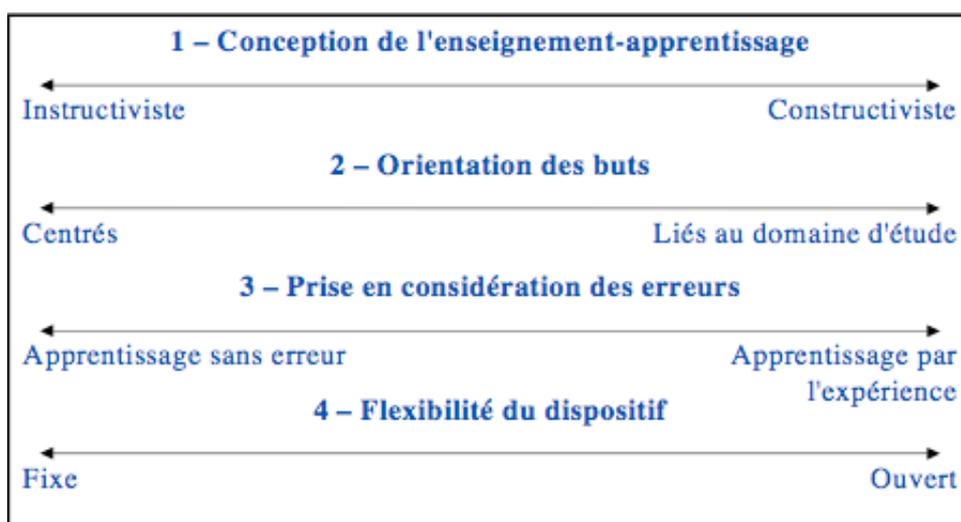
	<b>Paradigme d'apprentissage</b>	<b>Paradigme d'enseignement</b>
Convergences en enseignement	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Développement de <b>compétences</b>.</li> <li>• Réponses à des questions complexes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Acquisition de <b>connaissances</b>.</li> <li>• Développement d'<b>automatismes</b>.</li> </ul>
Conception de l'apprentissage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transformation d'informations et de savoirs en connaissances viables et transférables.</li> <li>• Intégration des connaissances dans des schémas cognitifs.</li> <li>• <b>Création</b> de relations.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mémorisation.</li> <li>• <b>Accumulation</b> de connaissances.</li> <li>• Association des connaissances les unes aux autres.</li> </ul>
Activités de la classe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• À partir de l'élève.</li> <li>• À partir de <b>projets</b>, de <b>recherches</b> ou de <b>situations problématiques</b>.</li> <li>• <b>Relations interactives</b>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• À partir de l'enseignant.</li> <li>• Fréquence élevée d'activités d'<b>exercice</b>.</li> <li>• Relations didactiques et verticales.</li> </ul>
Modes d'évaluation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En référence aux compétences développées.</li> <li>• Portfolios.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• En référence aux connaissances.</li> <li>• Tests exigeant des réponses brèves.</li> </ul>
Preuves De réussite	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Qualité de la <b>compréhension</b>.</li> <li>• Qualité des compétences développées.</li> <li>• Qualité des connaissances construites.</li> <li>• Transférabilité des apprentissages.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Quantité d'<b>informations</b> retenues.</li> <li>• Parfois la quantité de connaissances acquises.</li> </ul>

<sup>2</sup> J'ai pris la liberté de mettre en gras certains mots

Rôles de l'enseignant	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Axés sur l'<b>étayage</b> et le désétayage.</li> <li>• Parfois un apprenant.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un expert.</li> <li>• Un <b>transmetteur</b> d'informations.</li> </ul>
Rôles de l'élève	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un <b>constructeur</b> actif.</li> <li>• Un <b>collaborateur</b>.</li> <li>• Parfois un expert.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Un <b>récepteur</b> passif.</li> <li>• Un apprenant en situation d'<b>interlocuteur</b>.</li> </ul>
Attitudes et relations attendues de la part des élèves.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Entraide</b>.</li> <li>• Relations d'interdépendance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Individualisme</b>.</li> <li>• Relations de compétition.</li> </ul>

D'autres auteurs évoquent une opposition entre l'instructivisme et le constructivisme. Par exemple, l'étude menée par Récré@sup sur la conception, la mise en œuvre, l'analyse et l'évaluation de scénarios pédagogiques recourant à l'usage des Technologies de l'Information et de la Communication (WP2 de Récré@sup et Brassard et Daele, 2003). Ils proposent 17 dimensions sur lesquelles l'enseignant peut se positionner et effectuer un choix pour son propre scénario. Contrairement au tableau de J. Tardif, chaque dimension, on devrait plutôt parler de question, appel un choix de réponse ce qui produit un très grand nombre de positionnements possibles, d'autant plus que pour chaque question sont proposées deux réponses opposées, aux deux extrêmes, entre lesquelles il y a tout un continuum de nuances. Les 17 dimensions sont regroupées en quatre catégories.

Orientation et choix pédagogiques de départ :



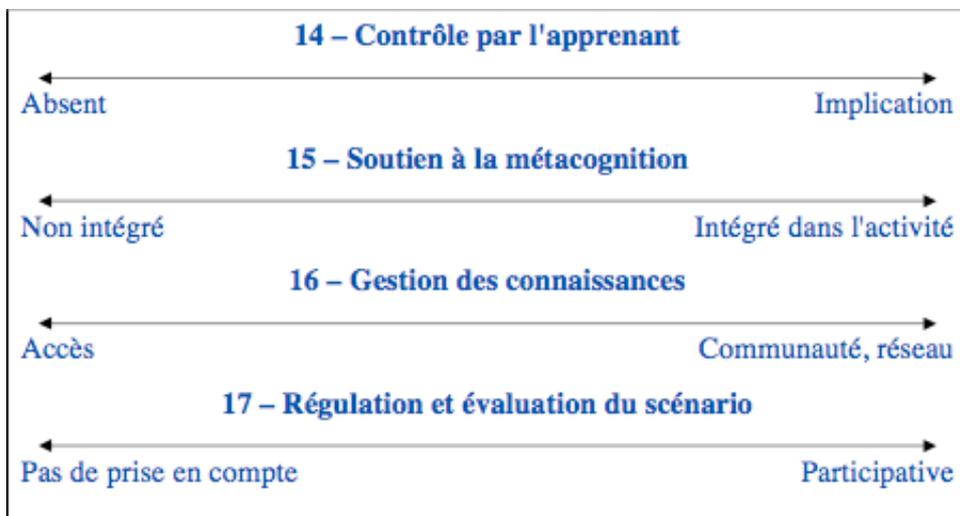
Acteurs et rôles :



Activités :



Outils et processus :



A ce type de travaux s'ajoutent les classifications des théories de l'apprentissage (dont les pères sont Bruner, Dewey, Piaget, Vigostsky, etc), en différents courants. De Vries et Baillé (2006) citent trois familles de courants pertinents, selon eux, pour les EIAH (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain) : celle des béhaviorismes, celle des cognitivismes et celle des constructivismes. Ces courants se déclinent en approches pédagogiques, elles-mêmes mises en oeuvre dans des scénarios.

Les approches pédagogiques sont pléthores et, comme le montre M. Lebrun (Lebrun, 2002, p120), elles peuvent apparemment emprunter des principes à plusieurs courants. Certaines ne s'appuient pas nécessairement sur les technologies, comme l'apprentissage expérientiel (Kolb, 1984), l'apprentissage par problème (APP ou PBL, problem-based learning), l'apprentissage par le projet, l'apprentissage par la découverte (J. Bruner), community of practices (E. Wenger), concept mapping (Novak, 1991), jeux de rôle, minds tools (D. Jonassen), situated learning, etc, D'autres points de vue sur l'apprentissage ont vu le jour avec les technologies éducatives, comme le CSCL (computer supported collaborative learning) ou le CSILE (Computer Supported Intentional Learning Environments, Scardamalia et Bereiter, 1994). Notons que ces approches ne sont pas exclusives, par exemple : l'APP inclus une phase importante collaborative qui peut être supportée par un ordinateur.

Enfin, on trouve toutes sortes de scénarios pédagogiques : l'apprentissage par problème de l'université Catholique de Louvain-la-Neuve (Raucent et al, 2004), « learning by designing » (e.g. Hmelo et al 2000), « learning by teaching » (e.g. Ching et al, 2005), « learning by making » (Papert et Harel, 1991), « computer supported inquiry learning » (de Jong, 2006), « classroom narrative » (e.g. Watson et al, 2004), et beaucoup d'autres.

Une autre façon d'aborder les questions d'apprentissage et d'intégration des technologies consiste à aller interroger les principaux intéressés. Par exemple, M. Lebrun (2002), après avoir recueillis différents discours sur l'éducation (comptes-rendus de groupes de réflexion, sondages, rapports), dégage des éléments communs aux différents publics (les universitaires, la communauté européenne, les industriels, les politiques, les étudiants) :

1. L'importance du contexte général (économique, social, politique...), source de motivation, d'autonomie, de prise de responsabilité ...
2. L'importance de savoir déceler, analyser, évaluer une information correcte. L'importance de savoir se poser les (bonnes) questions, se poser des problèmes dans des situations complexes.
3. L'importance des facteurs liés à l'interaction. L'interaction peut être développée, par exemple, dans la communication (au public) ou dans la collaboration (entre pairs).

4. « *L'importance de construire quelque chose de personnel, de se mettre en projet, de créer, d'évaluer son travail ou la situation, d'accepter et d'induire le changement* » (Lebrun 2002).

Parce qu'aucun questionnaire, ni aucun scénario n'est neutre, un outil de discernement est nécessaire pour élucider les logiques sous-jacentes et en mesurer les effets. Cet outil qui va être présenté dans la suite n'est pas un modèle ou une classification de plus mais une aide pour comprendre et discerner la posture prise, de façon explicite ou implicite, par l'enseignant, ou l'institution, ou l'EIAH. Je vais d'abord introduire cet outil et la manière dont nous le construisons, avant de le présenter avec des exemples illustratifs.

## **2.2 Elaboration de la carte des sens de l'expérience pédagogique**

En collaboration avec I. Kraus (Institut de Physique et Chimie des Matériaux de Strasbourg) et R. Nifle (Institut de l'Humanisme Méthodologique), j'ai commencé à élaborer une carte, « une boussole », permettant d'identifier et situer les sens possibles d'une expérience vécue par un étudiant telle qu'elle est organisée par l'enseignant. Par sens, il fait entendre ici le reflet des intentions de l'enseignant, sa finalité principale, la logique, la direction qu'il va donner à son enseignement. L'enseignant est dans un certain sens, mais aussi l'institution dans laquelle a lieu cet enseignement, et ce(s) sens va induire un sens dans lequel l'étudiant va aller (mais pas forcément, car il a sa propre histoire). Quel est le sens (la vocation) d'une institution comme l'université est une question que l'on pourrait se poser (mais ce n'est pas l'objet de cette étude). Ici, je m'interroge donc sur le sens de l'enseignement que l'on peut apercevoir au travers de la pratique de l'enseignant et de la manière dont il organise une situation à vivre par un étudiant.

Cette notion de sens est liée à celle que nous avons déjà vu dans le chapitre précédent, avec une majuscule. Un sens est une actualisation en situation du Sens, autrement dit une manifestation du Sens de l'enseignant. Un Sens (une disposition intérieure tendant vers une finalité éducative) peut être actualisé par plusieurs sens, selon la situation dans laquelle il se réalise. Dans le contexte éducatif, chaque actualisation de Sens, chaque sens, s'exprime dans une position sur l'apprentissage, un type de pédagogie, un type d'expérience pédagogique, des usages des technologies etc.

La notion de Sens, disposition d'être de la personne humaine, est centrale dans la théorie du Sens et des cohérences humaines (Nifle 1986). Elle s'accompagne d'une méthodologie de construction de cartes des sens pour n'importe quel thème.

Une telle carte des sens permettra :

- i. d'apprendre à discerner les sens possibles et à situer ces sens les uns par rapport aux autres (e.g. comparer les sens, ou postures prises par des enseignants ou des concepteurs d'EIAH),

- ii. de repérer et qualifier les sens pour pouvoir en choisir un, prendre position, et
- iii. de traduire le sens choisi en méthode, en réalisation, en pratique (e.g. concevoir et évaluer des scénarios d'apprentissage avec un EIAH).

La carte est donc une boussole. L'utiliser demande de la pratique et de la rigueur. Elle est représentée en deux dimensions sur la figure 1. Chaque *expérience pédagogique* est un vecteur sens placé sur cette carte. Une carte se définit donc comme un ensemble de sens, chaque sens peut ensuite être une situation pédagogique concrète.

La carte comporte deux axes, un axe que l'on nommera « détermination des résultats » et un autre axe que l'on nommera « implication de l'apprenant » ; ces dénominations deviendront plus claires dans la suite. Chaque axe figure une tension, une opposition.

- axe « implication de l'apprenant » (axe horizontal sur la figure 1)

Cet axe doit permettre de caractériser l'expérience pédagogique par rapport à son déroulement et à l'implication de l'étudiant, dans deux sens opposés (figurés par une opposition gauche/droite sur le tableau suivant et sur la figure 1).

Apprenant impliqué dans une mission	Apprenant dans une réflexion par rapport à un savoir
Une situation, avec une mise en scène, un thème et une problématique	Un thème, un contenu, des chapitres
Analyser, synthétiser, évaluer, par rapport à la problématique	Acquérir des connaissances en rapport à la thématique, observer, appliquer des règles connues, des lois
Travail en équipe (dynamique de groupe) en vue d'acquérir des compétences	Répétition d'exercices en vue d'acquérir des mécanismes mentaux et comportementaux
Centré sur la recherche d'une solution à un problème à partir des connaissances	Centré sur l'observation, la prise de notes, la restitution et les applications directes
L'apprenant se mobilise, participe à un travail de groupe, prend position	L'apprenant est dans sa réflexion (le plus souvent seul)

Du côté droit, les apprenants vont se concentrer sur leurs connaissances et la compréhension du thème dont l'intérêt motive à lui seul l'activité. Du côté gauche, les apprenants sont d'abord confrontés à une problématique plutôt qu'à une théorie. La mission qui leur est confiée est source de motivation. Dans la partie droite, l'étudiant est seul dans la mesure où le travail en groupe ne présente pas d'intérêt pour évoluer dans

ce rapport au savoir, qui est personnel. Dans la partie gauche, l'élément déterminant est la mission qui lui a été proposée. Dès lors, il va trouver un intérêt à travailler avec d'autres étudiants sur le projet et donc partager l'exclusivité de l'activité (que ce soit en collaboration ou en coopération, comme on le verra par la suite). Les initiatives prises par l'étudiant sont déterminantes, en particulier la prise de position. De plus, le côté gauche est centré sur l'apprenant et l'acquisition de compétences (et des connaissances qui les accompagnent), alors que le côté droit est centré sur le contenu de l'enseignement et les connaissances.

- axe « détermination des résultats » (axe vertical sur la figure 1)

Nous partons d'un point observable, à savoir les résultats, selon qu'ils sont prédéterminés ou non par l'enseignant.

<b>Les apprenants explorent l'inconnu, pensent et comprennent par eux-même</b>
<p>Résultats indéterminés</p> <p>Explorer l'inconnu, de nouveaux points de vue, des problèmes et des arguments originaux</p> <p>Chercher, dans un environnement qui évolue, accepter le changement</p> <p>Initiation à une forme de recherche, développe l'initiative et l'autonomie de l'apprenant</p>
<b>Les apprenants se plient au jeu pour obtenir des résultats attendus</b>
<p>Résultats prédéterminés par l'enseignant</p> <p>Imiter les pratiques du domaine, de l'enseignant, se plier au jeu de la simulation des pratiques</p> <p>S'entraîner, apprendre des conventions, des procédures et des méthodes utiles dans le domaine</p> <p>Formation, développe une capacité à reconnaître et reproduire</p>

Si les résultats sont prévisibles, cela signifie que l'apprenant va être dans un environnement contrôlé et bien connu de son enseignant. S'ils ne sont pas prévisibles, l'apprenant va naviguer dans un environnement qui peut évoluer, qui n'est pas forcément totalement connu et maîtrisé par l'enseignant. Ceci est le cas si l'enseignant laisse une part d'initiative à l'étudiant, comme il y en a toujours lorsque l'on enseigne à partir d'une situation-problème (de Vecchi et Carmona-Magnaldi, 2002). En haut, on demande à l'étudiant de produire quelque chose d'original (dans le sens que cela lui est propre,

même si bien sûr quelqu'un d'autre a pu suivre un chemin similaire). C'est ainsi que l'enseignant ne peut pas prévoir tout ce qui va être produit. A l'opposé, en bas, il n'est rien demandé de vraiment original à l'apprenant, celui-ci fera la même chose que les autres étudiants et l'enseignant a déjà tout prévu.

- la carte des sens de l'expérience pédagogique

Après avoir décrit les deux axes de la carte, vertical et horizontal, nous pouvons les croiser. Nous allons nous demander quel type d'expérience pédagogique se situe entre le sens « les apprenants se plient au jeu » et le sens « les apprenants dans une réflexion par rapport à une connaissance », etc. Nous obtenons ainsi quatre croisements que nous allons caractériser. Il y a bien sûr une infinité de vecteurs dans chaque quadrant et donc une infinité de sens. Nous avons choisi de les regrouper en seulement quatre types pour simplifier notre analyse. Il serait possible d'affiner l'analyse et d'en obtenir plus, avec la difficulté qu'il faudrait alors distinguer des vecteurs (des sens) de plus en plus proches les uns des autres.

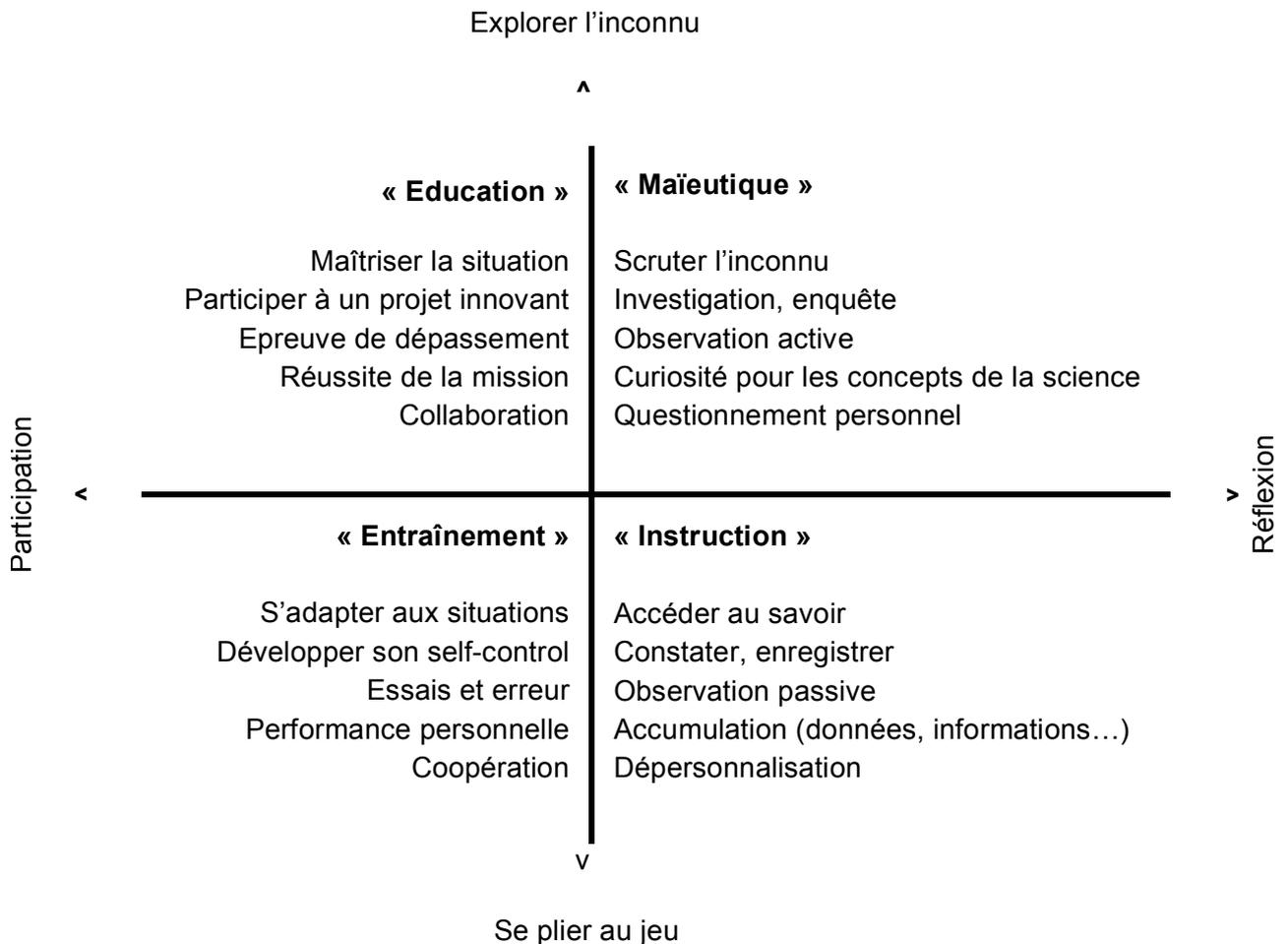


Figure 1  
Carte des sens de l'expérience pédagogique.

Définir chaque sens, ou posture, permet d'articuler des intentions pédagogiques et didactiques avec les méthodes d'enseignement et/ou les usages des technologies éducatives. Nous allons illustrer ceci par des exemples, pour chaque quadrant. On pourra aussi consulter l'étude de D. Chabaud et R. Nifle (2004) pour des exemples sur l'apprentissage des opérations mathématiques par les enfants et une carte centrée sur un thème proche du nôtre.

i) « Instruction »

Nous sommes dans une logique instructiviste. Elle est souvent opposée à une logique constructiviste (voir [recre@sup](mailto:recre@sup)). Est-elle dominante à l'université en France ? Cela reste à vérifier. Une étude sur les Travaux Pratiques universitaires en biologie et en physique semble indiquer que c'est le cas (Maisch, 2006). Un constat similaire est fait par B. Darley pour les TP de biologie à l'université qui ont, le plus souvent, un objectif d'illustration (Darley, 1994).

Technologies éducatives : l'enseignant peut proposer un cours en ligne aussi complet que possible (une caractéristique que l'on retrouve dans le paradigme « enseignement » de J. Tardif). A ce cours est associé un questionnaire qui doit à la fois inciter les étudiants à réfléchir et les guider dans leur réflexion. L'étudiant utilise les propriétés des hypertextes pour progresser de question en question et se reporter au cours au besoin.

ii) « Maïeutique »

Nous sommes dans une logique de questionnement, questions et réponses sur un contenu donné, dans un but d'acquisition de connaissances (Socrate soumettant son élève au questionnement maïeutique). Une des formes possibles de cet enseignement est l'investigation conduite par des recherches personnelles sur le thème considéré et suscitant des questions de l'élève à l'enseignant. Ce processus n'est pas piloté par les réponses attendues, car l'élève serait alors réduit à décoder les attentes de l'enseignant (caractéristique de l'axe du bas) au lieu de trouver ses réponses propres au questionnement. A la différence de l'« éducation » (ci-dessous), l'investigation est orientée par une question scientifique précise plutôt que par une situation-problème ou un projet.

Technologies éducatives : Sur Internet, l'étudiant trouve des encyclopédies, des bases de données ou des ressources documentaires l'aidant à répondre à ses questions et à en poser de nouvelles. Il utilise avantageusement les moteurs de recherche pour explorer de nouvelles ressources, de nouvelles pistes, et se construire une représentation de l'objet ou concept étudié.

iii) « Entraînement »

Nous sommes dans une logique de formation. L'apprenant va développer ses capacités en s'exerçant. Le travail en équipe permet d'avancer, mais, au bout du compte, chacun mesure ses propres performances et sa capacité à résoudre un grand nombre de

problèmes standards.

Technologies éducatives : Des questionnaires en ligne, à choix multiples et de niveaux de difficulté progressifs, ou des didacticiels, seront utiles pour s'exercer, améliorer sa performance en termes de résultat et de rapidité d'exécution. Un jeu peut être scénarisé afin de mettre en compétition les étudiants pour stimuler cet entraînement.

iv) « Education »

L'important, c'est d'apprendre à maîtriser des situations dans des environnements changeants, acquérir du discernement pour pouvoir prendre position, savoir changer de point de vue sur le monde. L'étudiant effectue ses recherches en collaboration avec un groupe d'apprenants. Le groupe est un atout pour l'apprentissage car il y partage avec d'autres son expérience, sa culture, ses jugements et ses connaissances. Cette position nécessite un apprentissage d'une certaine maîtrise de son comportement et donc de la situation.

Technologies éducatives : Dans un environnement virtuel (Cho et al 2003 et chapitre 2), les élèves peuvent faire une expérience. Ils peuvent explorer et expérimenter dans cet espace virtuel construit pour re-présenter le phénomène comme s'il se déroulait sous nos yeux. L'apprenant pourra y faire des observations, des expérimentations, sans pour autant changer le cours des événements (comme ce serait le cas s'il se confrontait à un phénomène naturel). Grâce à la technologie du virtuel ambiant, les apprenants peuvent expérimenter des hypothèses de réponse sans que cela se réduise à faire varier des paramètres comme cela est suggéré artificiellement dans beaucoup de simulations.

### **Quelques points de comparaison du sens « éducation » avec d'autres discours.**

Plusieurs éléments observés dans des discours sur l'éducation par M. Lebrun se retrouvent dans le sens « éducation », plus particulièrement le point 4. Les deux paradigmes (enseignement et apprentissage) de J. Tardif (1998) détaillés plus haut semblent proches respectivement de l'« éducation » et de l'« instruction ».

On peut aussi citer la phrase de J. Dewey (dans Reboul, 1989) qui affirme que « *le pédagogue doit susciter l'intérêt véritable, c'est-à-dire la participation du moi tout entier à l'oeuvre qu'il accomplit. Tout enseignement doit être une réponse, c'est-à-dire à la fois les questions intellectuelles et affectives que les élèves se posent. Cette dialectique question/réponse se réalise concrètement dans l'oeuvre.* » M. Develay (2000) s'interrogeant sur le sens de l'école, insiste aussi sur le sujet et son projet : « *(1) aider les élèves à donner du sens à l'école, c'est donner du sens aux apprentissages et (2) donner du sens à l'école, c'est se mettre en projet au plan personnel et au plan professionnel. Il n'y a d'apprentissage que si le sujet qui apprend trouve du sens dans les situations d'enseignement qu'il vit.* »

## Que faire avec la carte des sens ?

Il faudrait situer différents courants pédagogiques dans la carte (ce travail ambitieux reste à faire).

Elucider la finalité au travers des pratiques est un enjeu de la conception (traduire le sens) et de l'analyse (discerner le sens) de scénarios pédagogiques intégrant (ou non) les technologies. Citons un exemple de pratique pédagogique où il serait utile de discerner et caractériser le sens : la méthode globale et méthode syllabique de lecture. Certains parleront d'une approche « analytique » vs. une approche « synthétique » (de Vries et al 2006, les opposent). S'il y a autant de débat et de controverse, c'est sans doute que ce sont plus que deux méthodes, ce sont deux sens, les deux méthodes étant chacune caractéristique d'un sens opposé à l'autre.

Il est possible d'utiliser la carte pour discerner le sens dans une pratique mais cela pose un certain nombre de problèmes. Les quatre sens mis en avant (figure 1) se présentent rarement sous une forme épurée et si un travail d'élucidation du sens (se poser la question pourquoi ?) est nécessaire pour comprendre la finalité principale d'une expérience pédagogique, il doit se faire en toute maîtrise de la carte. Il s'agit d'élucider le sens, la finalité principale, sachant que l'on ne peut pas se fier à un seul critère. Par exemple, la présence d'un cours magistral n'est pas un critère discriminant du sens « instruction ». Dans le sens « éducation », ce cours sera par exemple au service du projet des étudiants, comme c'est le cas du cours de « restructuration » de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve (Raucent et al 2004) qui pratique l'apprentissage par problème.

Dans le cadre du stage de master de C. Maisch, nous avons mis au point une série de questions et conduit un entretien dirigé auprès de 12 concepteurs de TP universitaires à l'aide de ce questionnaire. Cela a permis de situer sur la carte des sens des couples TP/enseignant. La totalité de ces couples se trouvent être soit dans le sens « éducation » soit dans le sens « instruction ». Nous analysons actuellement une deuxième série d'entretiens, semi-dirigés (instructions au sosie), des couples ayant été situés dans le sens « éducation » afin de mieux caractériser ce sens et de l'illustrer par des exemples de pratique (de TP en l'occurrence). La suite de ce travail qui se poursuit par une thèse va aboutir à la construction de modules dans le sens « éducation » (il serait bien sûr possible de le faire aussi dans les autres sens). C'est là notre option sur l'apprentissage.

Dans la suite, je vais revenir en arrière et présenter un autre projet qui a démarré avant ce travail sur la carte des sens (figure 1). Ce projet a comporté plusieurs phases, la dernière d'entre elles (section 3.5) étant une première tentative de construction d'un module pédagogique et d'une méthodologie de conception d'un tel module, dans le sens « éducation ».

### 3. Enseigner les mathématiques pour les sciences expérimentales, avec un environnement informatique

#### 3.1 Introduction

Mes enseignements, dans la période 2001-2006, ont tous eu pour thème les mathématiques comme langage pour d'autres disciplines. Cette expérience d'enseignante est la source des questions posées au chapitre 2 relatives à la place des mathématiques et de la modélisation dans les sciences expérimentales. Les domaines étaient la biologie (Licence 1<sup>ère</sup> année et 2<sup>ème</sup> année, parcours biologie, université Lyon 1) ou la physique (Formation Active en Science, premier cycle ingénieur, INSA de Lyon) avec des activités caractéristiques des sciences expérimentales, comme par exemple la récolte et le traitement de données ou l'étude de modèles et de simulations de phénomènes biologiques ou physiques. De plus, je me suis attachée à introduire des pédagogies actives (Lebrun 2002) soutenues par des environnements informatiques :

- Apprentissage par problème, expériences virtuelles et outils mathématiques pour les sciences de la vie (projet MathSV).
- Apprentissage par le projet, construction collaborative d'un site Web et outils mathématiques pour les sciences de l'ingénieur.
- Travaux Pratiques avec Maple© et initiation à la modélisation en biologie ou en physique.

Dans cette section, je vais présenter le projet MathSV qui a démarré en 2001 par un projet pédagogique de l'université Claude Bernard Lyon I pour se poursuivre par l'introduction de l'apprentissage par problème en Licence 1<sup>ère</sup> année (dès le printemps 2004) et par une recherche expérimentale sur l'impact des hypermedia sur l'apprentissage (hiver 2004).

Pour ce projet, la transformation des situations et des méthodes d'apprentissage a été un enjeu essentiel de l'environnement informatique. Cette expérience m'a montrée la complexité de telles innovations et m'a questionnée sur ses aspects didactiques, psychosociologiques, organisationnels, voire institutionnels, « *des interrogations antécédentes et fondamentales* » (Lebrun 2002 et section 2.1), questions qui m'ont conduite peu à peu à réorienter mes projets de recherche.

#### **Pédagogie universitaire et Web.**

En France, l'utilisation des sites Web dans la pédagogie universitaire est un phénomène relativement récent, mais en plein essor (en particulier à l'université Lyon I en 2001, date du démarrage de notre projet). Un grand nombre d'étudiants utilisent actuellement des sites Web universitaires pour accéder à des informations sur leurs

cours, organisation et contenu, et sur les parcours possibles dans le cadre de la réforme LMD. L'objectif de ces innovations est d'inscrire l'enseignement universitaire dans l'évolution technologique des sociétés dites développées et de donner aux étudiants des « *connaissances indispensables pour la vie d'aujourd'hui et de demain* » (Fillon, 2004). Un objectif affiché est de « *faire en sorte que l'ordinateur soit, tout comme le livre ou le cahier, l'un des instruments naturels de l'enseignement* » (Curien & Muet, 2004, p.75). Dans ce contexte, une question importante du point de vue pédagogique se pose : est-ce que les étudiants apprennent mieux avec ces nouveaux dispositifs ?

Face à ces attentes, il n'existe encore que peu de travaux de recherche de terrain. De plus, la plupart des recherches empiriques réalisées montrent que l'apport pédagogique des hypermédias est en fait d'une portée limitée. Dillon et Gabbard (1998), dans une revue de littérature de référence, soulignent que les bénéfices des hypermédias éducatifs se limitent à certains types de tâches et profils d'apprenants. Il n'y a pas de preuve, affirment-ils, que les hypermédias soient généralement plus efficaces que les moyens traditionnels (papier) pour apprendre. Dans un article plus récent, l'un des auteurs fait essentiellement le même constat (Dillon, 2002; cité par Hall et al., 2003). Savelsbergh et al. (2000) ont trouvé que des étudiants utilisant une interface informatique d'apprentissage de l'algèbre, en plus des cours traditionnels, n'avaient pas de meilleures performances d'apprentissage que leurs collègues ayant seulement eu les cours. Les étudiants ayant utilisé l'interface ont dit avoir dépensé beaucoup d'efforts (perception de charge cognitive) pour apprendre à utiliser le système.

Plusieurs facteurs expliquent les difficultés signalées par les auteurs. D'une part, nous trouvons les facteurs ergonomiques. La faible lisibilité des écrans d'ordinateurs rend la lecture plus lente et coûteuse. Des études d'ergonomie et d'oculométrie ont montré que les conditions de lecture sont moins bonnes à l'écran que sur papier, car il existe à l'écran des problèmes de résolution, de typographie, de scintillement, de contraste entre autres (Caro & Bétrancourt, 1998; Baccino, 2004; Nielsen, 2000). Dans des conditions optimales, cependant, on a observé que la lecture d'un texte sur écran n'est pas plus lente que celle d'un texte sur papier (Mayes et al., 2001). D'autre part, nous trouvons les facteurs liés à la maîtrise de l'écrit par les utilisateurs. L'utilisation de documents hypermédias s'avère être une activité complexe, qui requiert des stratégies de lecture sophistiquées, comme par exemple, de naviguer entre différentes sources d'information à travers des liens associatifs, de reconnaître les sources, de garder en mémoire "qui a dit quoi", et de gérer sa navigation sans se désorienter. Ces stratégies correspondent à un modèle cognitif, le "modèle documentaire", que possèdent les lecteurs experts, mais pas les novices (Britt et al., 1999). Enfin, les hypermédias soulèvent un problème de structuration et de consultation des contenus pédagogiques. Il ne suffit pas de mettre du contenu en ligne, mais il faut trouver une bonne structuration des cours, guider l'activité des étudiants et ne pas les laisser simplement "naviguer" (Benyon et al., 1997).

Nous avons mené une recherche expérimentale en conditions écologiques afin de comprendre quels sont les apports d'un environnement informatique pour

l'apprentissage, à l'université Lyon I. Je préciserai quels types d'apports nous recherchions, mais avant cela, je vais introduire le projet plus large dans lequel cette recherche expérimentale s'inscrit.

### 3.2 Le contexte du projet MathSV

En septembre 2001, une section pilote en Deug de biologie 1ere année, avec 200 étudiants inscrits, est créée à Lyon 1 pour bénéficier d'une pédagogie multidisciplinaire innovante (du moins en ce qui concerne les cours de mathématiques et certains domaines de la biologie, biologie animale, biologie végétale, génétique etc) intégrant les technologies de l'information et de la communication. Chaque équipe enseignante introduit les technologies dans l'enseignement de son domaine et le tout est intégré dans un site Web commun. Après deux années d'existence, le fonctionnement de cette section a été étendu à l'ensemble des quatre sections et ce sont aujourd'hui près de 800 étudiants qui chaque année, dans le cadre du L1 de la Licence "Sciences et Technologies" mention "Biologie", profitent de cet enseignement.

Le projet MathSV est créé pour l'enseignement des « Mathématiques : outils pour les Sciences de la Vie » (Charles et al. 2003, Ney et Charles 2003). Notons que MathSV est aussi le nom donné au site Web qui accompagne ce dispositif. J'en ai assuré la coordination avec S. Charles (maître de conférence au laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, Lyon I). J'ai participé à la réalisation du site Web et à la mise en place de la nouvelle répartition des enseignements (voir plus loin). J'interviens également auprès des étudiants (cours magistraux et travaux tutorés). Enfin, j'ai conçu et coordonné un apprentissage par problème basé sur le site MathSV (section 3.5).

Le projet MathSV est le fruit d'une collaboration étroite entre enseignants et informaticiens du Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive et de la cellule de développement de PRACTICE dirigée par Christophe Batier. Le site web MathSV a servi de prototype à la plate-forme pédagogique SPIRAL (<http://spiral.univ-lyon1.fr>) mise à disposition des enseignants et des étudiants par PRACTICE, à partir d'octobre 2003.

L'objectif annoncé de cet enseignement de mathématiques en sciences de la vie est de montrer aux étudiants, à partir d'une situation réelle concrète, la nécessité de mobiliser des savoirs à la fois en biologie et en mathématiques, pour décrire, analyser et comprendre un phénomène biologique. Cependant, mettre en scène l'interdisciplinarité n'est pas simple en première année de 1er cycle universitaire, la difficulté première étant de montrer l'intérêt du dialogue entre mathématique et biologie (chapitre 2) aux étudiants. Aussi avons-nous clarifié nos attentes en définissant plusieurs objectifs spécifiques pour aider les étudiants à mieux comprendre ce qu'ils ont à apprendre. Dans les grandes lignes, il s'agit pour les étudiants de :

- Capitaliser des connaissances mathématiques de base, en analyse et sur les probabilités et statistiques, par l’acquisition de concepts, de théories et de techniques.
- Faire émerger des compétences par l’utilisation, la combinaison, la généralisation et la mobilisation de ces connaissances pour la résolution d’un problème biologique.
- Etre autonome, s’auto-évaluer, dialoguer, collaborer, pour acquérir un certain savoir-être dans le domaine de la Biologie Mathématique.

Ces objectifs relèvent d’une approche convergente où les disciplines sont rassemblées afin de résoudre un problème (Rege Colet 2002). La pédagogie interdisciplinaire se doit de limiter l’enseignement frontal au profit de méthodes d’enseignement qui, d’une part, favorisent le travail collaboratif et, d’autre part, permettent de structurer le travail individuel (Rege Colet 2002). Ainsi, pour ce nouveau cours de mathématiques en sciences de la vie, différents types de ressources pédagogiques ont été mis en place afin de répondre aux divers objectifs présentés ci-dessus. L’interdisciplinarité a été définie au chapitre 1 (section 3). Quant à la transdisciplinarité, telle qu’elle est définie au chapitre 1, elle ne faisait pas partie, à l’origine, des objectifs explicites de ce projet.

Des cours magistraux (CM). Ils sont réduits de 40% par rapport à un enseignement traditionnel ; les CM présentent les principales notions méthodologiques, illustrées par de nombreux exemples en biologie.

Des travaux tutorés (TT). Ils rassemblent les étudiants par petits groupes (environ 15 étudiants) en présence d’un tuteur et en salle informatique. Lors de ces TT, les étudiants tentent de capitaliser un maximum de connaissances sur des notions essentielles du cours, au travers de QCM. Puis, à partir de 2004, ils vont s’initier au travail collaboratif avec la résolution de situations-problèmes. Les tuteurs suivent également les étudiants à distance (e-mail et forum).

Des travaux dirigés (TD). Mathématiques et biologie sont mises à contribution dans la résolution d’un problème biologique, qu’il faut formaliser (mettre en équation), décrire et analyser, puis interpréter.

Ce dispositif a été mis en place dans le souci d’aller vers la construction d’un savoir intégré, en associant plusieurs niveaux cognitifs selon la taxonomie de Bloom (1956) :

- L’analyse (niveau 4), par la traduction mathématique d’une question biologique : décomposer le problème de départ en sous-problèmes, distinguer ce qui est pertinent de ce qui ne l’est pas, distinguer les hypothèses des faits, etc.
- La synthèse (niveau 5), par la résolution, en dehors d’un contexte théorique pur, d’un problème mathématique appliqué à la biologie : concevoir une stratégie de résolution, combiner solutions mathématiques, faits expérimentaux et connaissances antérieures pour interpréter et conclure, etc.

– L'évaluation (niveau 6), par le développement de l'esprit critique des étudiants : porter un jugement sur la valeur de certaines méthodes, de certains résultats, utiliser des critères de valeurs spécifiques au champ des mathématiques et au champ de la biologie, etc.

Enfin, et c'est essentiel, un site Web accompagne ce dispositif, que ce soit en présentiel ou à distance. Ce site est consultable sur <http://mathsv.univ-lyon1.fr> dans une version différente de la version d'origine dont je vais surtout parler ici. Ce site est un véritable environnement informatique pour l'apprentissage humain (EIAH) car il propose des situations actives d'apprentissage et de résolution de problèmes (Luengo et al 2006). Pour cela, il intègre, dans un ensemble cohérent, des cours en hypermedia, des simulations d'expériences et des QCM avec un bureau virtuel individualisé et des outils de communication (agenda hebdomadaire, forum).

### 3.3 L'environnement informatique d'apprentissage MathSV

L'environnement informatique, développé à partir du printemps 2001, est accessible par un site Web organisé en quatre rubriques : Cours, Tests, Agenda et Infos (Charles et al., 2003).

- La rubrique « Cours » contient les chapitres de cours accompagnés d'une synthèse, des formulaires, un glossaire des principaux concepts mais aussi des exercices et des problèmes, des annales. C'est l'équivalent du polycopié classique avec cependant un effort de représentation graphique important ainsi qu'une grande variété de problèmes biologiques illustrant le cours.
- La rubrique « Tests » contient des questions à choix multiples (QCM), avec des corrigés et des hyperliens vers chaque sous-chapitre où se trouve la bonne réponse. Elle est conçue pour être une entrée sur le cours.
- La rubrique « Infos » contient un plan du site, un moteur de recherche, des ressources pédagogiques à destinations d'autres enseignants et des informations de contact avec les membres de l'équipe pédagogique de Lyon I.

La rubrique « Agenda » contient le programme hebdomadaire de l'unité d'enseignement avec des consignes sur les chapitres de cours à étudier, les exercices à préparer et les problèmes à résoudre, des informations pratiques et d'actualité scientifique en Biologie et Mathématiques. Cette rubrique donne aussi accès à un bureau virtuel personnalisé, qui permet à l'étudiant de consulter un tableau récapitulatif de toutes ses visites au site, avec des cases de différentes couleurs pour représenter les différentes activités et leurs résultats. Les résultats individuels sur les exercices sont affichés avec la moyenne du groupe, permettant à l'étudiant de comparer son niveau avec celui de l'ensemble de sa section (figure 2).

Pourquoi un environnement informatique ? Au début du projet, l'une des fonctions principales de l'environnement informatique MathSV est de permettre aux étudiants de travailler des notions mathématiques qui ne sont que rapidement abordées en cours magistral et de résoudre des exercices en faisant le lien direct avec des informations disponibles sur les chapitres de cours. De plus, MathSV remplace (et complète) le traditionnel polycopié, autrefois distribué aux étudiants au début de l'année sous forme imprimée (actuellement les étudiants reçoivent une version résumée du polycopié). La

ANALYSE	Fonctions - Généralités	Limites - Continuité	Dérivation - Etude de fonctions	Fonctions usuelles	Primitives - Intégration	Equations différentielles
Synthèses de cours	A chap 1 (54)	A chap 2 (44)	A chap 3 (36)	A chap 4 (33)	A chap 5 (44)	A chap 6 (46)
Auto-évaluations QCM	test 1 (128) (100)	test 1 (92) (100)	test 1 (125) (100)	test (102) (100)	test 1 (156) (425)	test (148) (448)
	test 2 (114) (168)	test 2 (84) (130)	test 2 (99) (174)		test 2 (132) (360)	
Exercices d'application	Série 1 : 1-1*a)b), 1-3*a)d), 1-1**a)b), 1-2**b), 1-3**, 1-4**c)	Série 1 : 1-1*a)b), 1-3*a)d), 1-1**a)b), 1-2**b), 1-3**, 1-4**c)	Série 1 : 2-1*a), 2-2*, 3-2*, 4-1*, 6-1**	Série 1 : 2-1*a), 2-2*, 3-2*, 4-1*, 6-1**	Série 2 : 1-1*a)b)c)d)e), 1-1**c), 2-1**, 2-2**, 3-1**	Série 3 : 1-1**, 1-2**, 1-3**, 2-1**, 2-2**, 2-3**, 3-1**a)b), 3-2**a)b), 3-3**a)b), 3-5**
	C'est fait <input checked="" type="checkbox"/> (115)	C'est fait <input checked="" type="checkbox"/> (105)	C'est fait <input checked="" type="checkbox"/> (99)	C'est fait <input type="checkbox"/> (91)	C'est fait <input type="checkbox"/> (88)	C'est fait <input type="checkbox"/> (78)

Figure 2

Un tableau récapitulatif individuel de la navigation au travers du site. Cinq chapitres sur six ont été consultés. Les chiffres entre parenthèses indiquent le nombre d'étudiants ayant déjà effectué la lecture ou les exercices demandés. Il est possible d'obtenir des moyennes sur les QCM.

résolution d'exercices avec le site se fait principalement lors des séances de travail tutoré (TT), avec la médiation d'un tuteur, mais les étudiants peuvent aussi le faire individuellement, à la maison, pour tester leurs connaissances et se préparer aux examens. Enfin, MathSV est un lieu d'interaction, en dehors des cours, entre enseignants et étudiants.

L'interface graphique de MathSV a été conçue par l'équipe du projet, en particulier Lionel Humblot (informaticien du laboratoire Biométrie et Biologie Evolutive, Lyon 1), sur la base d'exemples de sites similaires et d'un travail original de développement de schémas de couleurs, typographie, illustrations, menus de navigation. L'équipe n'a pas fait appel à des critères explicites d'ergonomie ou à des grilles d'évaluation ergonomique durant la conception et mise en place du projet.

Nous avons réalisé une série de sondages, entre 2001 et 2003 et donc avant la recherche expérimentale de l'hiver 2004, avec les étudiants ayant utilisé MathSV

(section pilote) et les autres (section classique). Ces sondages ont montré que les étudiants étaient globalement satisfaits du dispositif pédagogique incluant l'utilisation du site (voir Ney & Charles, 2003, pour une analyse complète de ces sondages). Cependant, les notes à l'examen final n'ont pas varié avec l'introduction de ce dispositif, pas plus que le contenu des copies d'examen qui semblent indiquer des difficultés dans la résolution d'exercices et de problèmes qui se perpétuent.

Mis en perspective avec les résultats des observations des années passées, les objectifs du dispositif, en particulier permettre aux étudiants de résoudre des exercices tout en consultant les chapitres de cours et motiver les étudiants en sciences de la vie pour l'apprentissage des mathématiques, nous ont amené à poser deux questions pour une recherche expérimentale :

- (a) Est-ce que le site permet aux étudiants de résoudre les exercices de façon aussi (ou plus) efficace qu'un document imprimé ?
- (b) Dans quelle mesure les étudiants sont-ils satisfaits des matériels pédagogiques et plus motivés pour apprendre ?

### **3.4 Recherche expérimentale**

Quels sont les apports pédagogiques de notre environnement informatique ? De multiples réponses peuvent co-exister, selon la perspective et le niveau d'analyse adoptés. Ici, nous parlons d'apport pédagogique lorsque l'installation et l'usage de certaines parties de l'environnement MathSV ont pour résultat l'amélioration objective et mesurable des résultats obtenus par les étudiants dans des exercices portant sur les contenus de cours, par rapport à l'enseignement dispensé au moyen des ressources traditionnelles.

Nous avons mis en oeuvre une recherche basée sur la collecte de données provenant d'utilisateurs étudiants, faite dans des conditions contrôlées, et la quantification des résultats. Cette recherche a été coordonnée par Mônica Macedot-Rouet dans le cadre de son séjour post-doctoral (bourse de l'Agence Universitaire Francophone) au laboratoire URSIDOC à l'université Lyon I. Un protocole expérimental a été mis en place avec l'accord des enseignants. Un chapitre du site Web (le chapitre sur les équations différentielles) a été choisi comme sujet des tests de connaissance, de par son importance et sa place dans le programme.

Avant de réaliser l'étude avec les utilisateurs, nous avons entrepris une évaluation par inspection de l'environnement informatique MathSV, en utilisant la grille ergonomique de Scapin et Bastien (1997). Une telle évaluation est recommandée comme faisant partie des mesures pour détecter des éventuels problèmes d'utilisabilité d'un site et suggérer des changements d'interface. L'inspection nous a permis de constater certains problèmes d'ergonomie (par exemple, un problème de guidage dans le groupement des

items, exprimé par différents type de menus changeant d'une rubrique à l'autre et nous a conduit à suggérer des modifications, notamment sur l'organisation du contenu (format des menus), la typographie et couleurs employées, avec l'objectif d'améliorer l'ergonomie du site. Cependant, nous n'avons pas directement intégré ces modifications à la version Web définitive. Afin de nous assurer qu'elles représentaient de véritables améliorations ergonomiques, nous avons construit une version expérimentale (avec moins de liens hypertextes, moins de couleurs, une typographie simplifiée, une moindre densité informative), dite « version ergonomique », de MathSV et l'avons testée en comparaison à la « version initiale ».

Nous avons décliné les deux questions posées (section 2.3) en cinq hypothèses :

H1 - Utilité du cours écrit - La lecture du chapitre sur les équations différentielles aura un effet positif sur la compréhension du contenu, les étudiants ayant un meilleur score dans un test de connaissances après lecture de ce chapitre.

H2 - Charge cognitive – H2.1 La « version ergonomique » aura un effet positif sur la perception de « charge cognitive » des étudiants par rapport à la « version initiale ». H2.2 La perception de charge sera moins importante pour les étudiants ayant une plus grande expérience avec les technologies.

H3 - Ergonomie - Les étudiants travaillant sur la « version ergonomique » feront des parcours de navigation plus linéaires et consulteront moins de fois des pages déjà visitées que ceux sur la « version initiale ».

H4 - Papier vs. site *Web* - Une version papier du même contenu (texte disposé linéairement sur papier) entraînera des résultats plus bas que ceux de la « version ergonomique » (idem pour la « version initiale »).

H5 - Satisfaction et utilisabilité - Les étudiants travaillant sur la « version initiale » du site seront plus satisfaits que les étudiants travaillant sur la « version ergonomique » ou la version papier. Cette hypothèse est fondée sur le fait que les étudiants perçoivent positivement la technologie Internet/site Web et qu'ils sont attirés par le design original et attractif de la version initiale (schéma de couleurs, logos, typographie).

Signalons que deux autres hypothèses ont été testées dans le cadre de cette recherche bien qu'elle ne soient pas directement liées à l'utilisation d'un environnement informatique.

H6 - Besoin de cognition (la tendance d'un individu à s'engager et à tirer du plaisir des activités de réflexion) - Les étudiants avec un plus fort « besoin de cognition » (Cacioppo et al. 1984) auront des scores de compréhension meilleurs, quelque soit le mode de présentation.

H7 - Croyances épistémologiques (la vision, plus ou moins naïve, d'un étudiant sur la connaissance et l'acquisition des savoirs) - La compréhension interagit avec les

« croyances épistémologiques » (Schommer 1990, Mason 2005). Les étudiants qui croient plus fortement que « le savoir s'acquière rapidement (quick knowledge) », que « le savoir est simple (simple knowledge) » auront des scores plus bas.

Pour tester ces hypothèses, cinq questionnaires ont été élaborés ainsi que deux tests de connaissances :

- Q1 - Un questionnaire sur les données d'âge, de sexe et d'expérience d'utilisation du Web.
- Q2 - Un questionnaire de 18 items sur les besoins de cognition, notre adaptation en français du questionnaire de Cacioppo et al (1984).
- Q3 - Un questionnaire sur les croyances épistémologiques (notre adaptation française du questionnaire de Schommer, 1990) composée de 68 assertions portant sur cinq dimensions : la structure du savoir, la certitude, le contrôle individuel et la rapidité d'acquisition des connaissances.
- Q4 - Un questionnaire de perception de charge de 6 propositions (notre traduction française du NASA TLX : « Workload assessment tool » développé par la NASA pour évaluer des environnements informatiques et disponible sur <http://www.nrl.navy.mil/aic/ide/NASATLX.php>).
- Q5 - 10 propositions sur la perception de l'utilisabilité et 12 propositions sur la perception de satisfaction du site ou du photocopié.
- T1 - Un QCM de connaissances initiales (« pré-test ») comprenant 10 questions sur les équations différentielles.
- T2 - Un QCM de 18 exercices et mini-problèmes sur les équations différentielles. Les questions étaient de quatre types : chercher une information, calculer, poser ou résoudre un problème (biologique), donner une définition.

A ceci s'ajoute un programme de trace que j'ai développé afin de transformer les log bruts du site Web (gardant traces de toutes les actions des étudiants dans ce site) pour analyse. Nous nous intéressions en particulier au temps passé à répondre à chaque question, aux pages consultées (y compris sur plusieurs fenêtres différentes ouvertes en même temps), au nombre de pages cibles trouvées (celles où l'on sait que se trouve l'information utile pour répondre à certaines questions) en lien avec H3.

Trois séances expérimentales ont été prévues pendant les heures de cours pour encourager une participation massive des étudiants. Trois sections ont participé à ces séances, soit environ 450 étudiants de 1<sup>er</sup> cycle en Biologie (75% de femmes, âge moyen 18.8 ans).

1. La première séance a été consacrée à Q1, Q2 et Q3. Cette séance s'est faite pendant

une réunion de rentrée avec les étudiants, en amphithéâtre. Les étudiants ont été informés des objectifs de la recherche par l'expérimentateur et ont été invités à répondre aux questionnaires sous forme papier (pour lecture optique). Au préalable, ils avaient reçu une explication et démonstration du fonctionnement de MathSV. Les étudiants ont mis 20 à 30 minutes pour répondre aux trois questionnaires.

2. La deuxième séance a été consacrée à T1. Elle s'est déroulée à la fin d'un cours magistral sur le thème des équations différentielles. Les étudiants ont mis 20 à 30 minutes pour faire ce test.
3. La troisième séance a consisté, pour les étudiants, à travailler comme dans une séance de travail tutoré ordinaire mais sans intervention du tuteur. Ils devaient faire le T2, tout en consultant le chapitre sur le même thème. Après chacune des 18 questions de T2, ils devaient remplir Q4. Après avoir terminé T2, ils devaient finalement répondre à Q5. La séance a duré entre 45 et 60 minutes selon les groupes.

Pour la troisième et dernière séance expérimentale, les étudiants ont été répartis dans quatre groupes expérimentaux, par TT, selon le support de cours et d'exercices dont ils allaient disposer :

Groupe 1 – « version initiale » du site (cours et test T2)

Groupe 2 – « version ergonomique » du site (même contenu)

Groupe 3 – photocopié (même contenu)

Groupe 4 – pas de cours (uniquement T2, sur papier)

Je ne vais pas ici détailler tous les résultats (Ney et al 2005, Macedo-Rouet et al 2006 et un article en préparation). Les résultats suivants ont été obtenus sur un échantillon de N=122 étudiants. Le résultat le plus significatif (du point de vue statistique) et aussi le plus étonnant est sans doute que les étudiants utilisant le photocopié résolvent plus d'exercices correctement que les étudiants utilisant MathSV, que ce soit la « version initiale » ou la « version ergonomique » (voir H4 et figure 3).

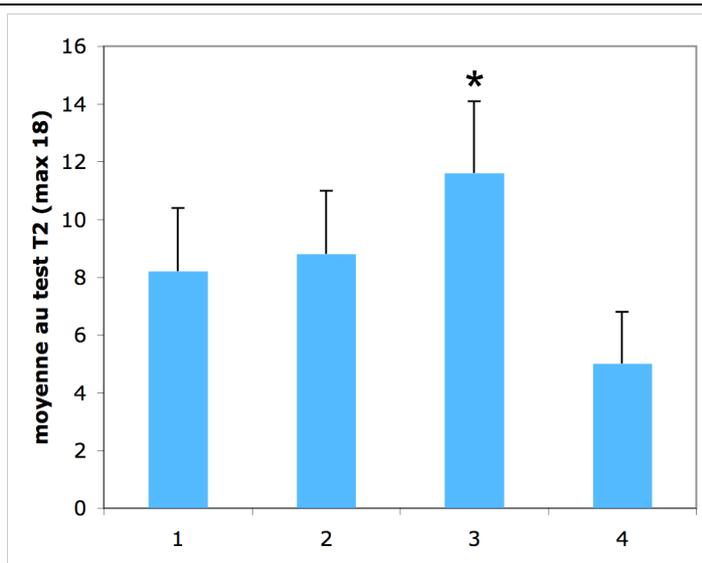


Figure 3

Résultats au test T2 en fonction du groupe (1 à 4, voir texte). L'effet du media est significatif ( $p > 0.001$ ) et explique 35% de la variance. Le groupe polycopié (3) obtient des résultats plus élevés que les deux groupes site Web (1 et 2) qui eux mêmes sont supérieurs au groupe contrôle (4).

L'hypothèse H1 a été vérifiée puisque le groupe contrôle a eu des résultats significativement moins bons que les groupes ayant eu accès au cours. Par ailleurs, les étudiants trouvent plus facile d'utiliser le polycopié que le site (H5) et ce pour plusieurs raisons (clarté de la table des matières, lecture plus fatigante à l'écran, etc) et la majorité d'entre eux préfère imprimer le cours plutôt que le consulter en ligne. De plus, quelle que soit la version du site, les résultats des étudiants ne sont pas significativement différents en termes de performance. Il n'y a pas de différence significative globale sur Q5, quant à la perception d'utilisabilité ou de satisfaction. Sur certaines propositions cependant, il y a des différences entre « version initiale », « version ergonomique » et polycopié.

Différences significatives ( $\chi^2$ )	Site initial	Site ergonomique	Polycopié
Désaccord : « Je ne suis pas satisfait de l'esthétique du site/polycopié »	69.8	50.0	55.6
Accord : « Le menu/table des matières était clair et facile à utiliser »	51.2	63.2	94.4
Désaccord : « La lecture sur écran/papier m'a fatiguée »	41.9	31.6	88.9

L'analyse des traces de navigation dans MathSV a confirmé que la version ergonomique n'apportait pas de gains, ni au niveau du temps, ni au niveau du nombre de pages cibles trouvées (celles contenant la bonne réponse). Cependant, des corrélations ont pu être établies. Pour en citer deux, il y a eu une corrélation positive ( $p > 0.5$ ) entre la performance de l'étudiant au test T2 et le temps qu'il a passé sur son questionnaire (0.39), entre sa performance et le nombre total de page visitées (0.40). Ces corrélations sont similaires pour les deux versions du site. L'hypothèse H3 n'est donc pas vérifiée.

<b>Moyennes (écart-types) sur la durée du test T2</b>	<b>Site initial</b>	<b>Site ergonomique</b>	<b>p</b>
<b>Temps (minutes)</b>	41 (8.3)	39 (8.5)	ns
<b># pages visitées</b>	33 (16.3)	38 (15.2)	ns
<b># pages cibles</b>	7.4 (3.61)	8.5 (2.79)	ns
<b>Charge cognitive (NASA-TLX)</b>	7.9 (2.7)	6.9 (2.2)	ns

Enfin, le questionnaire Q5 (NASA-TLX) n'a pas mis en évidence un effet positif de la « version ergonomique » sur la perception de « charge cognitive » des étudiants par rapport à la « version initiale » (H2). Pour conclure, les modifications apportées à la version initiale du site afin d'améliorer son ergonomie n'ont donc pas porté leurs fruits. De même, il n'a pas non plus été possible de mettre en évidence une perception de charge différente pour les étudiants ayant une plus ou moins grande expérience avec les technologies (corrélation Q1 et Q5, hypothèse H2.2).

Par rapport aux expériences antérieures dans le même domaine, ces résultats confirment que l'apport pédagogique des sites Web peut s'avérer assez limité et qu'il importe de s'interroger sur les types de pédagogie qui bénéficieront réellement de ce genre de support. Notre interprétation de ces résultats est que les documents en ligne sur MathSV se sont avérés être moins bien adaptés que le photocopié dans un contexte de résolution d'exercices à l'aide de chapitres de cours, pour des raisons liées à la lisibilité sur écran et à la praticité de la consultation du support papier. En référence à la théorie de la charge cognitive (Sweller 1994), notre étude suggère que la notion de charge pourrait expliquer (au moins en partie) les différences de performance entre des individus utilisant un système d'informations sur papier et un système informatisé de type site Web. Avec le site, les étudiants doivent dépenser une partie de leurs ressources cognitives pour la navigation et la lecture à l'écran, et cela se fait au détriment de leur performance.

Les leçons que l'on peut tirer de cette recherche expérimentale sont toutefois limitées

sur au moins deux points. Notre expérience s'est déroulée sur une période de temps restreinte et propose une photographie instantanée alors qu'une analyse à long terme pourrait révéler des différences, notamment au niveau de la rétention de l'information. De plus, l'usage d'un environnement informatique constitue un phénomène relativement nouveau dans l'enseignement universitaire, auquel les étudiants pourraient s'habituer dans les années à venir, ce qui pourrait changer leurs attentes quant à ce dispositif. Enfin, notre étude concerne seulement un usage particulier des sites Web, à savoir la recherche d'informations pour répondre à des questions. En particulier, cette recherche d'information a été construite à partir d'une seule source, et qui plus est, très structurée et linéaire : organisée en sous-chapitres de cours, sachant que les énoncés des questions évoquent souvent les titres de ces sous-chapitres. On peut se demander si les résultats seraient inversés dans le cas d'une recherche d'information plus ouverte et moins structurée. En effet, de Vries et al (2006) rappellent que selon la théorie de la flexibilité cognitive les étudiants ayant un rôle actif pour chercher et étudier l'information (ils se construisent leurs propres parcours dans l'espace d'information) peut produire des effets sur la qualité de leur productions.

Cette recherche expérimentale qui s'est déroulée durant l'hiver 2004 a été conçue sur la base des Travaux Tutorés tels qu'ils avaient été mis en place à l'origine, c'est-à-dire essentiellement comme des séances de travail sur le cours via les QCM. Une nouvelle pédagogie impliquant un nouvel usage de MathSV a été mise en place au printemps 2004 et sera présentée dans la section qui suit. Il serait intéressant d'en évaluer les apports pédagogiques par une nouvelle recherche expérimentale (cela n'a pas été fait à ce jour).

### **3.5 Méthodologie pour faire évoluer la pédagogie en TT : apprentissage par problème basé sur un environnement informatique**

Les questions énoncées en introduction de ce chapitre sur le rapport entre savoir et expérience vécue dans l'apprentissage ont germé au cours de l'évolution du projet MathSV et ne sont donc pas à son origine. C'est à la suite d'une semaine de formation (septembre 2003, Faculté des Sciences Appliquées, Université Catholique de Louvain-la-Neuve) à l'accompagnement tutoré dans l'apprentissage par problème (APP) que j'ai décidé d'introduire une nouvelle forme d'apprentissage se basant sur l'environnement informatique MathSV. Ceci a été mis en place au printemps 2004 pour les 450 étudiants (30 groupes de TT) avec lesquels nous avons aussi fait l'expérimentation exposée plus haut. Aujourd'hui, ce dispositif est toujours en place.

A l'université Catholique de Louvain-la-Neuve, un dispositif innovant fonctionne à grande échelle (pour la majorité des enseignements d'une filière) pour des promotions d'environ 450 étudiants et sur deux années consécutives (Raucent et al 2004). Il a fait l'objet d'une évaluation étendue sur plusieurs années et prenant en compte la question difficile des compétences spécifiques acquises lors d'un apprentissage par problème. Les résultats de cette évaluation ont été publiés récemment (Galand et Frenay 2005).

Avant MathSV, avant 2001, les séances d'exercices, se réduisaient souvent à des TD traditionnels, des « cours de rattrapage » du cours magistral centrés sur la préparation aux examens. Ce genre de TD est classique dans un contexte universitaire d'enseignements disciplinaires et cloisonnés. On y propose le plus souvent des problèmes désincarnés (c'est le problème de qui ?), déconnectés des réalités (économiques ou culturelles) de notre époque et finalement peu propices à éveiller le questionnement chez les étudiants. De nombreux travaux (à la suite de ma participation au colloque de l'Association Internationale de Pédagogie Universitaire en 2002) m'ont convaincue de la nécessité d'introduire dans nos enseignements un apprentissage actif qui rende l'étudiant acteur (non seulement avec ses mains mais aussi avec sa tête) et pourquoi pas auteur de ses connaissances et de ses compétences.

La démarche adoptée pour faire évoluer cette pédagogie a abouti à un scénario pédagogique dans le sens « éducation » réunissant les conditions suivantes :

- Des situations-problèmes sous forme de défis qui donnent du sens à l'activité et font émerger le questionnement chez les étudiants.
- Des activités de recherche d'informations sur un site Web et de résolution de problème passant par l'analyse de données acquises par une expérience virtuelle.
- Le rôle positif du travail de groupe pour une pédagogie de la réussite (tout le monde aboutit, grâce au groupe).
- Une amorce de métacognition (prendre du recul sur son apprentissage et sa méthode de travail).
- Un enseignant qui devient tuteur, plus accompagnateur que simple transmetteur de savoir.

La première année de la mise en place de cet APP, deux thèmes ont été choisis pour faire l'objet de deux situations-problèmes. Le premier est la résolution d'équations différentielles avec un problème sur les bio-capteurs de bactéries (chapitre 2, section 5.4). Le deuxième est la prise de décision en environnement aléatoire avec un problème d'échantillonnage d'arbres d'une forêt conduisant à des tests d'hypothèses (voir ci-dessous). Il y a, en effet, deux approches bien différentes qui sont successivement enseignées dans ce cours : l'approche déterministe avec des notions d'analyse usuelles y compris sur les équations différentielles et l'approche statistique (en commençant par des notions sur les probabilités).

Pour chacun des deux problèmes, un scénario a été construit à partir du croisement de trois analyses :

- i. épistémologie du domaine enseigné,
- ii. contexte et objectifs pédagogiques généraux,

iii. objectifs pédagogiques de chaque période, chaque situation-problème.

Ces analyses ont été effectuées par les méthodes d'élucidation de Sens et de créativité proposées par l'Institut de l'Humanisme Méthodologique (Nifle 1986). Par ailleurs, une équipe de sept enseignants-chercheurs a participé à la mise au point des situations-problèmes et du planning des séances.

La première analyse est probablement la plus difficile, mais elle est essentielle car elle permet d'introduire la spécificité de l'approche mathématique (déterministe ou probabiliste) dans la conception du scénario. Elle avait pour but de donner une trame au scénario, guider la conception de la situation-problème et de l'environnement informatique (en l'occurrence les expériences virtuelles) et surtout de s'assurer de la pertinence du scénario par rapport au savoir en jeu. Il s'agit de maîtriser le sens que la situation donne au savoir. Ceci répond aux questions posées en introduction et rejoint l'hypothèse « épistémologique » de G. Brousseau (1998) « *qu'il existe pour tout savoir une famille de situations susceptibles de lui donner un sens correct* ». Le terme correct fait référence à l'histoire du concept à enseigner, au contexte de son utilisation (en l'occurrence les statistiques sont utilisées en biologie), voire à la communauté scientifique concernée. Ainsi, nous avons pu nous interroger sur le cheminement intérieur que l'étudiant va suivre dans la situation d'apprendre à identifier un problème de statistique dans un contexte biologique. Reconstruire ce cheminement est un travail épistémologique que nous avons ébauché avant la mise en place de cet apprentissage et qui a donc permis ensuite de concevoir des situations-problèmes et une partie de l'environnement informatique (de compléter MathSV). Le terme « cheminement » indique qu'il ne s'agit pas de déterminer des étapes rigides mais bien une progression, progression du questionnement (Maulini, 2001).

A partir d'une analyse préliminaire des concepts et de la philosophie de l'approche probabiliste, nous avons dégagé trois grandes étapes du cheminement de l'étudiant en situation de résoudre pour la première fois un problème du ressort de la statistique (une « pensée » peu familière à la majorité des étudiants en première année à l'université) :

- (1) Expérimenter l'approche déterministe et son échec pour cause d'intervention de l'alea. Se positionner comme celui ou celle qui cherche un explication/une solution et expérimenter l'alea et le besoin d'une approche probabiliste.
- (2) Problématiser dans une démarche probabiliste afin de poser le problème, de définir les objectifs pour y répondre, le projet, et d'émettre des hypothèses (non sans avoir constaté l'échec de méthodes intuitives ou trop simplistes).
- (3) Développer la démarche probabiliste/statistique et conclure : prendre position en situation d'incertitude, proposer une réponse, une décision, et la confronter à l'ensemble des « réponses acceptables ».

Ces trois étapes ont ensuite été détaillées et contextualisées et des supports

pédagogiques dédiés ont été développés :

- Une situation-problème : elle a été conçue pour amener les apprenants à faire l'expérience de « la prise de décision en situation d'incertitude et de la confrontation des solutions ». Elle leur donne un rôle et une question, à partir desquels ils pourront problématiser (en langage biologique puis mathématique) et ensuite résoudre le problème.

### **Problème pour les TT de statistiques**

Vous êtes l'assistant d'un ingénieur forestier de l'Office National des Forêts.

Vous allez procéder à la révision annuelle des forêts afin de décider des coupes à blanc à prévoir, dans un massif du Vercors.

Une évaluation des coupes se basant sur vos propositions sera ensuite effectuée afin de confectionner le catalogue des ventes d'automne. Par ailleurs, vos propositions permettront de choisir les modalités de plantation d'arbres, ces modalités pouvant avoir un impact sur la répartition des arbres et sur leur croissance.

La valeur marchande de l'arbre augmente avec son diamètre. Une forêt est exploitable si le diamètre moyen des arbres qui la composent est supérieur à 50 cm.

Vous avez la possibilité de connaître les diamètres des arbres de quatre forêts à l'aide d'une expérience virtuelle (à partir du site MathSV) :

la forêt des Coulmes (naturelle), la forêt de la Loubière (une plantation sapinière plantée en 1930), la forêt d'Ambel (une plantation de sapins de 1932) et la forêt de Lente (une plantation de sapins de 1949).

1ère partie : Proposez une méthode qui permette de reconnaître les forêts exploitables dès à présent. Appliquez-la aux quatre forêts citées.

2ème partie : Déterminez un ordre de priorité dans l'exploitation des forêts sélectionnées dans la 1ère partie, selon leur valeur marchande.

3ème partie : Après avoir étudié la répartition spatiale des arbres des quatre forêts, proposez une stratégie de plantation qui vous paraît rentable.

Vous travaillerez successivement sur chaque partie. Vous rédigerez un compte-rendu détaillé justifiant votre choix pour chacune des trois parties, en restant le plus général possible.

- Une expérience virtuelle : elle permet aux étudiants de recueillir des données et ainsi d'« expérimenter la variabilité ». Une animation développée en flash par PRACTICE (service TICE de l'université Lyon I) permet aux étudiants d'explorer une forêt et de recueillir des données statistiques sur les diamètres des arbres. Ils doivent sélectionner des arbres un à un, une expérience aussi proche que possible de l'échantillonnage, et peuvent ainsi générer plusieurs échantillons et surtout essayer plusieurs stratégies d'échantillonnage (en faisant varier la taille de l'échantillon ou la position des arbres et des zones échantillonnées). Ils peuvent également comparer leurs échantillons avec ceux des autres étudiants (par un système de base de données, les 450 étudiants ont la possibilité de visualiser sur un même histogramme les moyennes des échantillons de tous). L'histogramme de la moyenne est ainsi construit et pourra servir à un travail sur les intervalles de confiance.

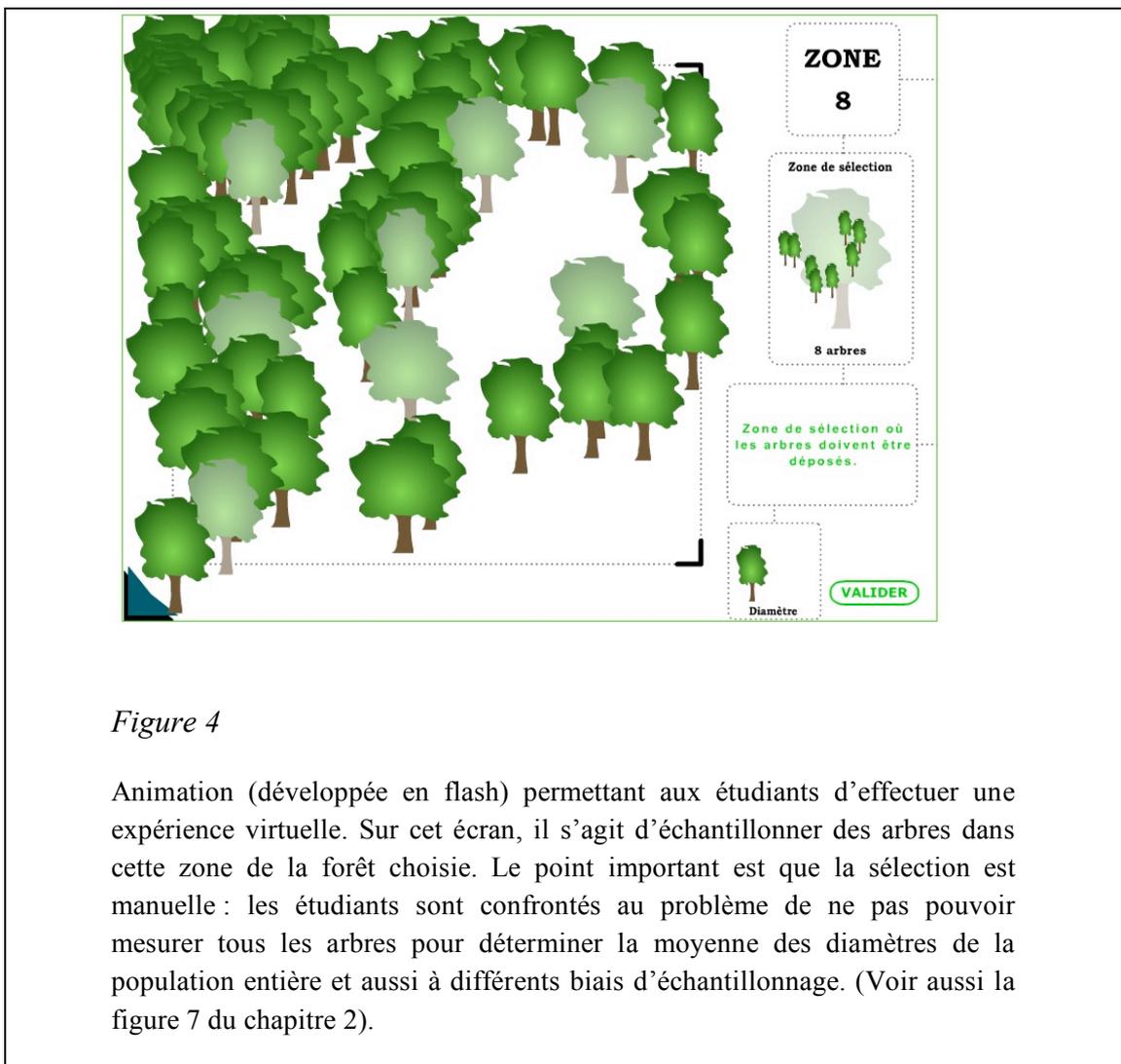


Figure 4

Animation (développée en flash) permettant aux étudiants d'effectuer une expérience virtuelle. Sur cet écran, il s'agit d'échantillonner des arbres dans cette zone de la forêt choisie. Le point important est que la sélection est manuelle : les étudiants sont confrontés au problème de ne pas pouvoir mesurer tous les arbres pour déterminer la moyenne des diamètres de la population entière et aussi à différents biais d'échantillonnage. (Voir aussi la figure 7 du chapitre 2).

- Le site Web MathSV, et plus particulièrement sa rubrique « cours » qui va aider les étudiants à « problématiser dans une démarche probabiliste puis poser des hypothèses ».
- Un guide du tuteur pour leur permettre de favoriser ce cheminement intérieur de l'étudiant. Ce guide propose aux tuteurs un grand nombre de questions à poser, de manière opportune en fonction de chaque étudiant, ainsi que des objectifs d'apprentissage. Par contre, on n'y trouve pas d'objectifs de réalisation, afin que les tuteurs ne se mettent pas à piloter les étudiants vers une résolution unique du problème.

Nous avons également développé un guide pour les étudiants afin de les initier au travail en groupe sur des situations-problèmes (Galand et Frenay, 2006), ces problèmes étant très différents de ceux sur lesquels les étudiants travaillent lors des séances TD traditionnels.

Un bilan à l'issue de la première année de la mise en place de ce dispositif a été fait au travers de l'analyse de deux sondages mis en ligne, à destination des tuteurs (9 réponses anonymes) et des étudiants (450 réponses anonymes). Les points positifs des TT aux yeux des étudiants sont multiples :

- \* Le fait de travailler en groupe (« en équipe » disent certains) est souvent mentionné dans les points positifs (et plus rarement dans les points négatifs).
- \* C'est une aide à comprendre le cours.
- \* Cela rend les maths plus concrètes.
- \* Cela donne un but aux maths et fait le lien avec la biologie.
- \* On apprend à résoudre des problèmes, à réfléchir, à analyser.
- \* Le rythme de travail est plus lent (plusieurs semaines sur un même problème).
- \* L'autonomie est plus importante.
- \* Les interventions du tuteur aident à réfléchir tout laissant le groupe trouver sa solution.

Cependant, beaucoup se demandent à quoi peuvent servir ces TT et surtout les trouvent moins importants que les TD. Ceci est sans doute dû au fait que les TD préparent directement aux examens qui sont restés classiques dans leur forme (résolution d'un problème découpé en une série de questions souvent indépendantes). Cela soulève le problème de l'évaluation comme « mise en valeur » de ce qui est important dans cet enseignement, les objectifs pédagogiques principaux. Un autre problème est lié au fait de faire suivre aux étudiants un module pédagogique allant dans un sens (e.g. « éducation ») tandis que l'ensemble des autres modules et probablement l'institution elle-même vont dans un sens différent (e.g. « instruction », opposé à l'« éducation » sur la carte des sens, voir figure 1).

Ce travail sur l'apprentissage par problème des statistiques en biologie n'est en réalité qu'une expérience préliminaire, à grande échelle. Il devra être suivi d'une recherche plus approfondie, en particulier en ce qui concerne l'analyse épistémologique et la conception de situations fondamentales (Brousseau, 1998).



## Perspectives

Depuis mon arrivée à Grenoble en septembre 2005, j'ai intégré ou initié trois projets de recherches, le projet ACI COPEX, une thèse en co-tutelle avec les Pays-Bas et le projet de l'équipe européenne CIEL. Ils permettent de revisiter les problématiques énoncées au chapitre 1. La problématique du rapport expérience / modèle déjà abordée au chapitre 2 est reprise dans le cadre du projet COPEX et de la thèse. Les problématiques de l'interdisciplinarité et de l'intervention de l'alea ont été abordées dans le cadre du projet MathSV décrit au chapitre 3. Elles sont aussi présentes dans le projet de l'équipe européenne CIEL et le projet de thèse.

### **Le projet COPEX : COnstruire des Protocoles pour apprendre les sciences EXpérimentales**

Le projet COPEX est financé par le ministère de la recherche (ACI Education et formation) pour une durée de 3 ans (2005-2007). Il est coordonné par Isabelle Girault. Les autres participants sont Cédric d'Ham, Patricia Marzin, Muriel Ney, Claire Wajeman (laboratoire Leibniz-IMAG), Eric Sanchez (INRP, Lyon), Erica De Vries (Laboratoire de Sciences de l'Education de Grenoble 2) et Viviane Guéraud (laboratoire CLIPS-IMAG), ainsi que quatre enseignants du secondaire (SVT et PC) associés via l'INRP (Institut National de Recherche Pédagogique).

De nombreux travaux (e.g. Coquidé 2003, Séré 1998) ont fait le constat que l'investigation scientifique était peu ou mal enseignée à l'école. Pour Coquidé (2003) « *Il semble bien que les travaux pratiques habituels aident peu les élèves à établir des relations entre concepts, percepts et objets matériels* ». De telles situations conduisent à développer des compétences qui relèvent de savoir faire techniques, des connaissances gestuelles, mais ne permettent pas de développer d'autres compétences caractéristiques du travail scientifique et ayant trait à la créativité, au raisonnement, aux méthodes, etc. Ces aspects du travail expérimental, intéressants et motivants pour les élèves, participent à la formation à la démarche scientifique, indispensable pour les élèves qui se destinent aux carrières scientifiques. Les résultats de recherche (Nott 1996, Séré 1998, Coquidé 2002, Hoffstein et Luneta 2003), semblent indiquer qu'il existe des difficultés : un tel enseignement semble difficile à mettre en œuvre pour les enseignants, d'une part en raison d'un manque de formation épistémologique, et d'autre part en raison des difficultés de la transposition de la démarche scientifique dans la classe, tant au niveau du secondaire que du supérieur. En particulier, si les élèves sont confrontés de

façon fréquente et régulière à des activités pratiques, les protocoles de travaux pratiques sont le plus souvent élaborés par les enseignants (Orlandi, 1991), l'activité des élèves étant limitée à leur mise en œuvre. Par ailleurs, il existe peu de logiciels permettant de préparer et de réaliser des activités expérimentales à distance et qui complèterai les simulations de phénomènes, elles plus nombreuses. Dans ce contexte, le projet COPEX, COncevoir des Protocoles EXpérimentaux pour apprendre les sciences expérimentales, a pour objet la construction de connaissances didactiques liée à l'activité de conception de protocoles par les élèves, dans le but de construire un environnement informatique qui aide enseignants et élèves à structurer cette activité.

Faisons d'abord un parallèle entre l'apprentissage de la construction de protocole et l'apprentissage de la construction d'un modèle. Comme nous l'avons fait pour la modélisation (chapitre 2), il faut distinguer plusieurs niveaux : (1) exécuter un protocole, (2) modifier un protocole, (3) construire un protocole à partir de plusieurs protocoles existants (4) concevoir un protocole original. De plus, la démarche de conception d'une expérience se définit au travers d'une trialectique sujet (intentionnalité), objet (objectivation), projet (projection) : un projet d'expérience résulte du rapport entre un objet qui fait problème au sujet, celui qui modélise et qui est porteur du questionnement, de l'intention. Si ceci est toujours vrai pour toute entreprise humaine, cela devient crucial lors d'activités complexes telles que la modélisation ou la conception d'une expérience. En effet, la conception d'une expérience, comme la modélisation, fait partie des compétences en sciences expérimentales qui sont peu enseignées et peu formalisées (Séré 2002). Pourtant, s'engager dans une tâche de conception est potentiellement une façon efficace de mobiliser ses connaissances, construire ses propres représentations et apprendre (voir par exemple les travaux issus des sciences de la cognition sur l'apprentissage et le raisonnement scientifique, Klahr & Dunbar, 1988). Des approches pédagogiques utilisées pour l'apprentissage de la conception ou de la modélisation sont actuellement l'apprentissage par l'exploration, par l'investigation et/ou par la collaboration entre pairs (e.g. Hmelo 2000, Hofstein & Lunetta 2003 et chapitre 2).

L'intitulé complet du projet COPEX est : « Construire des Protocoles pour apprendre les sciences EXpérimentales : des pratiques de classe actuelles à l'assistance par un environnement informatique ». Nous nous plaçons dans la situation suivante : (i) l'étudiant va apprendre à répondre à une question scientifique bien définie par le biais d'une expérience dont il construit le protocole, (ii) cette construction se fait au niveau (2) ou au niveau (3) ci-dessus, (iii) le protocole est un document écrit (plutôt qu'un plan conçu dans sa tête) qui est élaboré, du moins dans une version préliminaire, avant le début des manipulations. En ce sens, Le protocole est un objet de transaction pédagogique et scientifique. Pour nous, le protocole est la liste ordonnée des tâches expérimentales dont l'objectif est de déterminer des valeurs spécifiques en relation avec les hypothèses scientifiques qui sous-tendent le protocole. Chaque tâche est caractérisée par une intention explicite (pourquoi, dimension intentionnelle), un ensemble de paramètres dont les valeurs doivent être fixées, de contraintes, de matériel etc (quoi,

dimension objective) et une procédure comprenant des contrôles, une planification (comment, dimension projective). Nous faisons l'hypothèse qu'une formalisation et une structuration de la tâche de construction de protocole devraient aider l'apprenant à construire son propre protocole et par ce biais à s'appropriier l'ensemble de la démarche expérimentale, et nous avons construit un modèle de cette tâche (Wajeman et al 2005).

Le projet COPEX comprend trois volets. Le premier volet est une étude des pratiques actuelles de classe : nous recueillons et analysons des protocoles rédigés dans les fascicules de travaux pratiques en sciences expérimentales (biologie, physique, chimie et sciences de la terre) au niveau secondaire et universitaire. Le deuxième volet est centré sur l'enseignement de la construction de protocole : quelles sont les conditions pour que l'apprenant puisse construire un protocole, quelles sont les compétences requises, disciplinaires ou transversales, etc. Il s'agit aussi d'élaborer une méthode de construction de situations incluant la construction d'un protocole ainsi que d'analyse didactique de ces situations. Des activités originales sont actuellement conçues et testées lors de séances de Travaux Pratiques de terminale, en collaboration avec des enseignants. Dans le troisième volet du projet COPEX, cette activité est modélisée dans le but de concevoir un EIAH guidant les apprenants dans la construction d'un protocole (étape 3). La réalisation de cet EIAH est en cours, sous la conduite de Cédric d'Ham.

Je collabore à toutes ces étapes et j'ajoute un nouveau volet à ce projet, sur la question de la place du modèle dans la conception du protocole. L'objet de nos recherches, à savoir le protocole expérimental, n'est pas défini de manière universelle comme nous l'a montré une série d'entretiens avec des chercheurs ainsi qu'une inspection des fascicules de TP (lycée et université) dans les différentes disciplines. Cette question nécessite une étude approfondie pour définir les composantes, les formes, les fonctions du protocole dans un TP. Nous construisons une typologie des protocoles des Travaux Pratiques avec la méthodologie déjà utilisée pour construire la typologie des fonctions des modèles (chapitre 2). Nous la confronterons aux protocoles de fascicules de TP recueillis. Dans le cadre de cette analyse, j'étudie tout particulièrement la place du modèle scientifique dans le protocole d'un TP ce qui permet de définir des indicateurs des types de TP en usage au niveau étudié.

### **Le projet de thèse : enseigner la précision de la mesure**

Clément Maisch commence sa thèse sous ma direction en octobre 2006. Il effectuera sa thèse en co-tutelle entre l'université Joseph Fourier et l'université de Twente (Pays-Bas) et sera co-encadré par Wouter van Joolingen (Department of Instructional Technology, Twente). Nicolas Balacheff (Laboratoire Informatique de Grenoble) et Ton de Jong (Department of Instructional Technology, Twente) seront aussi impliqués dans la supervision de ce projet de thèse.

Les expérimentations en classe, dans le cadre du projet COPEX, ont permis d'identifier la précision de la mesure comme une difficulté mise en avant lors d'une activité de construction de protocole (Cross 2006). En effet, construire le protocole demande de prendre en compte cette notion de précision alors qu'elle n'est habituellement pas à la charge de l'élève. Le terme de « précision de la mesure » recouvre plusieurs aspects de la démarche expérimentale, certains liés à l'exécution de l'expérience et d'autres à l'analyse des données. Ce deuxième aspect, où vont intervenir les modèles mathématiques et statistiques, m'intéresse plus particulièrement.

Différentes définitions du terme « précision » permettent d'entrevoir la difficulté des élèves à le comprendre (Cross, 2006) :

- détail qui apporte une plus grande information,
- qualité globale d'un instrument, lui permettant de donner des indications qui coïncident, à une haute approximation près, avec la valeur vraie de la grandeur à mesurer,
- la précision d'une valeur indique le nombre de chiffres utilisés pour exprimer cette valeur,
- la précision d'un calcul (d'une mesure) est synonyme d'un calcul (d'une mesure) exact et d'une grande fidélité de fonctionnement.

La précision est une problématique de la mesure pour la pratique scientifique au laboratoire ou dans la classe, parmi d'autres situations. Legay donne un aperçu intéressant sur la notion de mesure (2004, p235) qui commence ainsi : « *La mesure est une action, probablement l'une de nos plus significatives. Elle résulte d'un besoin, la comparaison de deux objets, dont l'un est connu et sert de référence.* » Legay rappelle que la mesure était étroitement liée aux pratiques. Les mesures, les évaluations étaient d'abord rapportées au corps humain, liées au travail, au déplacement et à la communication. Il s'agissait de « *construire un univers à la mesure de notre corps* » (Legay & Schmid, 2004, p236). La mesure a évolué lorsque l'on a été confrontée à des évaluations d'objet physiquement inaccessibles et lorsque la mesure a été définie par des procédures de calculs et non plus seulement des manipulations expérimentales. Une autre évolution est celle apportée par les statistiques : on ne travaille plus sur des objets individuels mais sur des populations et des indices, comme le  $\chi^2$  pour distinguer deux populations à l'aide des variances, sont construits. La mesure s'est peu à peu éloignée de l'expérience sensible, puis de l'expérience factuelle, pour être essentiellement une expérience mentale dans certains cas. Cependant, le problème de celui qui mesure n'est pas de réduire un objet à son signe mais de savoir choisir, en fonction du projet et des objectifs, un certain nombre de variables, parmi celles qui sont possibles, et de les articuler. Prendre une mesure est donc elle-même modélisable comme une représentation (au sens du chapitre 2) de l'expérience. Enfin, parmi les différents sens du mot modèle, il y a le moule et la représentation, donc une idée de mesure (Legay 1973,

p24). C'est ce lien entre modèle et mesure que je voudrais explorer.

Ce thème de la mesure me permet d'aborder les différentes problématiques énoncées au chapitre 1, à savoir le rapport à l'expérience, l'intervention des probabilités et la transdisciplinarité. La mesure est une question transdisciplinaire par au moins deux aspects : la diversité des champs qui la composent (statistiques, calcul d'erreur et incertitude, grandeurs de la physique et unités, codage, etc) et son omniprésence dans tous les domaines (en ce qui concerne mes champs de compétence et mes centres d'intérêt, la physique et la biologie, les sciences de l'éducation et bien sûr les mathématiques qui possèdent un corpus de savoir bien établis, la théorie de la mesure).

Le fil conducteur de la thèse sera l'enseignement de la précision de la mesure. Un premier volet de la thèse permettra de faire un état des lieux et de répondre à des questions didactiques : quelle est la place de la précision de la mesure dans l'enseignement actuel ? quelles sont les compétences à faire acquérir aux étudiants ? quelles sont les situations expérimentales nécessitant de se préoccuper de la précision de la mesure ? dans quelle institution est-il pertinent d'enseigner la précision de la mesure ? Quelles sont les difficultés liées à l'enseignement de la précision de la mesure ?

Un deuxième volet consistera à reprendre la méthodologie ébauchée pour l'enseignement des statistiques pour les sciences de la vie (section 2.5) : comment concevoir une situation avec un apprentissage expérientiel, dans le sens « éducation » ? quel est le rapport entre l'objet à enseigner (la mesure) et la situation, entre les savoirs en jeu dans la précision de la mesure et l'expérience vécue dans l'apprentissage de la prise en charge de cette précision ? Quels sont les apports pédagogiques d'un environnement informatique dans ce contexte ? L'objectif est donc de concevoir une méthode opérationnelle, autrement dit, un ensemble de règles, de processus, d'outils, pour construire ces situations, les piloter et les évaluer.

Un troisième volet consistera à expérimenter sur un module d'enseignement la méthodologie mise en place précédemment : nous prévoyons de concevoir un TP pour le DUT mesures physiques, en utilisant la conception de protocole comme moyen d'apprendre à réduire les erreurs de mesure. Nous devons pour cela établir les spécifications du scénario du TP et de l'environnement informatique puis construire cet environnement avec l'existant (notamment ceux de notre partenaire de l'université de Twente) et enfin l'évaluer. Cette thèse en co-tutelle avec le groupe de T. de Jong à Twente a été rendue possible grâce à la collaboration démarrée récemment dans le cadre d'une équipe européenne du réseau Kaleidoscope.

## **L'équipe européenne CIEL : integrating Collaborative, Inquiry and Experiential Learning**

Le réseau d'excellence européen Kaléidoscope, dont la vocation est de placer l'apprentissage au centre d'une recherche interdisciplinaire basée sur les fondements théoriques des sciences de la cognition et de l'éducation mais aussi de l'informatique et de la technologie (<http://www.noe-kaleidoscope.org>), a vu le jour en janvier 2004 sous la direction scientifique de N. Balacheff.

Dans ce cadre, une équipe européenne ERT (European Research Team) a démarré ses activités en janvier 2006. Les 27 membres de l'équipe (étudiants et ingénieurs compris) appartiennent à six institutions, dont les représentants sont :

- Wouter van Joolingen (coordinateur) - Université de Twente, Faculté des Sciences Comportementales, Département des Technologies Educatives (NL)
- Barbara Wasson - Intermedia, Université de Bergen (NO)
- Sten Ludvigsen – Intermedia, Université d'Oslo (NO)
- Augusto Chiocciariello – Institut pour les Technologies Didactiques de Gènes – CNR Conseil Nationale de la Recherche (IT)
- Ulrich Hoppe – Institut d'Informatique et des Systèmes Interactifs, Faculté d'Ingénierie, Université de Duisburg (DE)
- Muriel Ney – Laboratoire Informatique de Grenoble (F)

En effet, je coordonne la participation de notre groupe (Cédric d'Ham, Isabelle Girault, Patricia Marzin et Claire Wajeman) à ce consortium.

Le projet de l'équipe s'intitule CIEL : « integrating approaches for Collaborative, Inquiry and Experiential Learning ». L'originalité de l'ERT CIEL réside dans le fait qu'elle tente de mettre en commun des approches de l'apprentissage jusque là relativement disjointes, à savoir l'apprentissage collaboratif supporté par l'ordinateur (CSCL), l'apprentissage par la démarche d'investigation (inquiry-based learning) et l'apprentissage expérientiel. Les objectifs de l'équipe sont de :

1. concevoir une approche théorique intégrative pour un apprentissage de la démarche scientifique qui soit expérientiel et collaboratif (un glossaire est en cours de construction),
2. développer une plate-forme commune (en particulier en travaillant sur l'interopérabilité de certains environnements développés par les membres, comme Co-Lab, CoolModes et bientôt COPEX),

3. tester cette plate-forme sur un scénario pédagogique commun et
4. monter des projets de recherche expérimentale se basant sur cette plate-forme, dans différents pays.

La démarche d'investigation est promue dans l'enseignement des sciences expérimentales en France, au primaire avec par exemple « la main à la pâte » et plus récemment au collège (BO hors série n° 5 du 25 août 2005, « introduction commune à l'ensemble des disciplines scientifiques ») : comme dans le primaire, les projets de rénovation des programmes de sciences au collège mettent l'accent sur la démarche d'investigation qui permet d'impliquer les élèves dans le travail mené en classe et de les associer à la construction du savoir. L'apprentissage par la démarche d'investigation est aussi l'objet de nombreuses recherches internationales en sciences de l'éducation. T. de Jong (2006), en référence au rapport PISA 2003, motive l'apprentissage par la démarche d'investigation soutenue par un environnement informatique ainsi : « ... *prepare for the requirements of society and the workplace* ». Dans le contexte des Travaux Pratiques, Hofstein et Lunetta (2003) soulignent qu'il ne s'agit pas d'une pratique nouvelle mais qu'elle réapparaît dans les programmes aux Etats-Unis (NRC, National Research Council 1996). Ils qualifient cette évolution ainsi : « *a shift from teacher-directed to purposeful-inquiry* ».

Une difficulté de l'apprentissage par la démarche d'investigation est de transposer cette démarche du scientifique dans le contexte de l'apprentissage. Une autre est d'utiliser l'environnement informatique pour faciliter et non alourdir la démarche. Cet apprentissage réunit les points suivants :

- *Un contexte pour l'investigation* : Cela inclut une question générale comme fil conducteur de l'investigation, des données, des informations, un environnement pour les interactions entre apprenants.
- *Une mission* : chaque groupe d'apprenant se voit confié une mission et un rôle à partir desquels il va construire son projet, sa problématique. Les apprenants s'approprient cette mission et sont clairement informés de ce qu'ils ont à faire et des moyens et méthodes disponibles.
- *Une source d'observations et d'expérimentations* : cette source peut être une expérience de laboratoire ou sur le terrain, une base de données dans laquelle les apprenants peuvent chercher ce dont ils ont besoin.
- *Une production témoignant des apprentissages* : cela peut-être une règle, une procédure, un argumentaire écrit, un modèle, un montage d'expérience, une présentation orale, etc. Cela permet aux apprenants d'exprimer ce qu'ils ont appris au cours de la démarche d'investigation.

- *Un support à la démarche d'investigation* : Plusieurs recherches (de Jong, 2006) ont montré que les apprenants avaient besoin d'un support pour les guider dans la démarche d'investigation. Cela peut être des indices pour poser des hypothèses, des exercices préparatoires, des questions, des conseils pour organiser la collaboration entre apprenants, etc

Chacun de ces points doit être pris en charge, avec ou sans environnement informatique. Cependant, les technologies apportent des aides sur différents aspects :

- *Expérimenter*. Remplacer le monde naturel par une simulation sur ordinateur peut permettre d'explorer ce phénomène plus largement (dans le temps et dans l'espace). De plus, la simulation va amplifier ou simplifier certains aspects du phénomène (de Jong, 2006a; de Jong & van Joolingen, 1998) Il s'agit de la simulation basée sur un modèle conceptuel (chapitre 2, section 1). Un environnement virtuel (Moher 2006) permet quant à lui de recréer en classe, pour les élèves, le phénomène tel qu'il se déroule dans la nature. Il s'agit d'une simulation basée sur un modèle opératoire (chapitre 2, section 1).
- *Un support à l'apprentissage*. L'ordinateur peut contenir différents outils d'aide à la démarche d'investigation, comme par exemple : des outils de visualisation et de traitement des données, des outils pour aider à formuler des hypothèses, des outils pour aider à construire des protocoles et enfin des outils pour gérer le projet.
- *Collaborer*. L'ordinateur va servir la collaboration entre apprenants grâce à des outils de communication des idées, des arguments, de partage des données et des informations, etc (van Joolingen, et al, 2005). Il peut permettre de créer une communauté de pratique autour du thème de l'investigation.
- *Modéliser et représenter*. Il y a plusieurs outils pour faciliter la modélisation (voir par exemple le tableau 1 chapitre 2). Dans certains cas (e.g. Co-Lab, van Joolingen, et al, 2005), un modèle peut être relié à une simulation d'expérience de manière à ce que les auteurs du modèle puissent vérifier concrètement leurs hypothèses sur les paramètres importants et l'influence des différents facteurs.

L'apprentissage par la démarche d'investigation recouvre en réalité plusieurs types de situations dans lesquelles l'apprenant se voit confier une « mission » : la recherche d'information pour développer un argumentaire, la conception et la réalisation d'une expérience ou la modélisation pour répondre à une question scientifique. C'est ce dernier type d'investigation qui m'intéresse plus particulièrement. Dans le cadre de l'objectif 3 de l'ERT CIEL, dont nous avons la responsabilité, nous avons conçu une situation d'apprentissage par la démarche d'investigation sur le thème de l'échantillonnage (suite aux travaux dans ce domaine décrits dans la section 3.5 du chapitre 3). Nous développons actuellement cette application : le scénario pédagogique,

la simulation, les différents supports informatiques à l'investigation. Il s'agira d'une démonstration de l'intégration des trois facettes de l'apprentissage : collaboratif, expérientiel et par la démarche d'investigation. Sur la base de ces travaux, nous répondons à un appel à projet européen (en 2007).



## Epilogue

Mon équipe actuelle (Sciences expérimentales, EIAH et didactique) fusionne avec deux autres équipes au 1<sup>er</sup> janvier 2007, pour former l'équipe MeTAH. Cette nouvelle équipe comptera une quarantaine de personnes dont 21 membres permanents aux compétences variées, en didactique (mathématiques, biologie, physique et chimie) ou en informatique (EIAH, intelligence artificielle, ingénierie des connaissances). Cette équipe fera partie du Laboratoire d'Informatique de Grenoble (LIG) qui voit le jour à cette même date. MeTAH deviendra la plus grosse équipe travaillant sur les environnements informatiques pour l'apprentissage humain (EIAH) en France. Elle fait, de plus, partie d'un groupe d'équipes et de chercheurs ayant des projets de recherche dans ce domaine et appartenant à différents laboratoires grenoblois.

Les objectifs scientifiques de l'équipe MeTAH sont de concevoir des modèles computationnels de connaissances épistémiques et didactiques, de concevoir et réaliser des logiciels d'aide à l'apprentissage, de spécifier et développer, à l'intention des formateurs, des environnements pour la conception, la mise en œuvre et le suivi des situations actives d'apprentissage et enfin, d'analyser les usages par les apprenants des EIAH.



## Références

### A

AMAT A., NEY-NIFLE M. & BERNSTEIN C. (à soumettre) An ecological perspective for the coexistence of sexual and asexual competitors in a fragmented environment.

### B

BACHELARD G. (1971). *Bachelard, épistémologie*. Textes choisis par Dominique Lecourt. Paris : PUF.

BACHELARD G. (1934). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris : PUF.

BACHELARD S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Éd.). *Elaboration et justification des modèles*. Paris : Maloine.

BACCINO, T. (2004). *La lecture électronique*. Grenoble: Presses Universitaires de Grenoble.

BALLEUX A. (2000) Évolution de la notion d'apprentissage expérientiel en éducation des adultes: vingt-cinq ans de recherche. *Revue des sciences de l'éducation*, Volume 26, numéro 2, <http://www.erudit.org/revue/rse/>.

BENKIRANE R. (2002) *La Complexité, vertiges et promesses : 18 histoires de sciences*. Paris, Le Pommier.

BENYON, D., STONE, D., & WOODROFE, M. (1997). Experience with developing multimedia courseware for the World Wide Web: the need for better tools and clear pedagogy. *International Journal of Human-Computer Studies*, 47(1), 197-218.

BERNSTEIN, C., KACELNIK, A. & KREBS, JR. (1988) Individual decisions and the distribution of predators in a patchy environment. *J anim Ecol* 57, p1007.

BESSIRE D. & BAKER R. C. (2005) « The French Tableau de bord and the American Balanced Scorecard: a critical analysis », *Critical Perspectives on Accounting*, 16 (6), pp. 645-664 (disponible sur <http://www.sciencedirect.com/>, article n°8 du TOP25 des articles de la revue, consulté le XXX).

BLOOM B. S. (1956). *Taxonomy of Educational Objectives, Handbook I: The Cognitive Domain*. New York: David McKay Co Inc.

BORZAK, L. (ed.) (1981) *Field Study. A source book for experiential learning*, Beverley Hills: Sage.

BOUSQUET F. (2001). *Modélisation d'accompagnement, simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables*. Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, université Claude Bernard, Lyon.

BRASSARD C. & DAELE A. (2003). Un outil réflexif pour concevoir un scénario pédagogique intégrant les TIC. *Actes du colloque EIAH 2003*, Strasbourg.

BRITT, M. A., PERFETTI, C. A., SANDAK, R., & ROUET, J. F. (1999). Content integration and source separation in learning from multiple texts. In S. R. Goldman, Graesser, A.

C., Van Den Broek, P. (Ed.), *Narrative comprehension, causality and coherence: essays in honor of Tom Trabasso* (pp. 209-233). Mahwah (NJ): Lawrence Erlbaum Associates.

BROUSSEAU G. (1998) *Théorie des situations didactiques*, Grenoble, La Pensée Sauvage

## C

CACIOPPO JT, PETTY RE & KAO CF (1984), The efficient assessment of need for cognition, *Journal of Personality Assessment*, 48, 3, p.306-307.

CALBERT, G. (1999) *Information, game theory and patch defence in the parasitic wasp *Trissolcus Basalis* Wollaston*. PhD thesis, University of Adelaide, Australia.

CAMPBELL N. L. (1996) *Biology* (4th edition). Addison Wesley Publishing Company.

CARO, S., & BETRANCOURT, M. (1998). Ergonomie des documents techniques informatisés : expériences et recommandations sur l'utilisation des organisateurs para-linguistiques. In A. Tricot, Rouet, J.-F. (Ed.), *Les hypermédias : approches cognitives et ergonomiques*. Paris: Hermès.

CASTELO M. K., NEY-NIFLE M., CORLEY J. C. & BERNSTEIN C. (2006) Oviposition height increases parasitism success by Mallophora ruficauda (Diptera: Asilidae) *Behavioral Ecology and Sociobiology* 61, p.231–243.

CERULLI M., CHIOCCARIELLO A., FERNAEUS Y., LEMUT E. & THOLANDER J. (2005) Exploring randomness via studying, building and sharing models. *Actes de la conférence EARLI (European Association for Research on Learning and Instruction)*, Chypre, août 2005.

CHABAUD D. & NIFLE R. (2002) *Postulats et postures scientifiques, mathématiques et pédagogiques*. <http://journal.cohérences.com>, rubrique « recherche et développements ».

CHALMERS A.F. (1987). *Qu'est-ce que la science ?*, Paris : Édition La Découverte.

CHARLES, S., NEY, M., MOUCHIROUD, D., HUMBLLOT, L., & BATIER, C. (2003). *Un site web pour l'enseignement inter-disciplinaire des Mathématiques en Biologie*. Proceedings de la Conférence Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH), Strasbourg.

CHEN, C., & RADA, R. (1996). *Interacting with hypertext : a meta-analysis of experimental studies*. *Human-Computer Interaction*, 11(125-156).

CHING E., CHIH-TI C., CHIH-YUEH C., YI-CHAN D., TAK-WAI C. (2005) A System to Support Preparing and Performing Peer Tutoring. *Proceedings 12th International Conference on Artificial Intelligence in Education (AIED 2005)*.

CHO, Y., MOHER, T. & JOHNSON, A. (2003). Scaffolding Children's Scientific Data Collection in a Virtual Field. *Proceedings of Conference on Virtual Systems and Multimedia (VSMM 2003)*.

CHOMAT A., LARCHER, M. & MEHEUT M. (1992). Modèle particulière et démarche de modélisation. In Equipe INRP/LIREST. *Enseignement et apprentissage de la modélisation en science*. Paris : INRP. p. 119-170.

CLARK, C.W. & MANGEL M. (2000) *Dynamic State Variable Models in Ecology*:

*Methods and Applications*. Oxford University Press.

- COLEMAN B.D. (1981) On random placement and species-area relationship. *Math. Biosci.* 54, p.191-215.
- COQUIDÉ M. (2000). *Le rapport expérimental au vivant*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Paris-Sud, Orsay.
- COQUIDÉ M. (2003). Face à l'expérimental scolaire. In J.-P. Astolfi (Dir.). *Education, formation : nouvelles questions, nouveaux métiers*. Paris : ESF. p. 153-180.
- CONDETTE J-P. (1984) *Conseil et cohérence dans l'organisation : contribution à la théorie des cohérences*. Thèse de doctorat en sciences de l'éducation de l'université Paris VIII.
- CORNU G. (1996) Le potentiel et le virtuel dans les images numériques : production et création. *Actes du séminaire « Écrit, Image, Oral et Nouvelles technologies »*.
- CROSS D. (2006) *Etude didactique de la conception d'un protocole expérimental en chimie par les élèves, à partir de l'analyse des difficultés et de la formalisation écrite des protocoles*. Mémoire de master recherche en didactique des sciences de l'université Joseph Fourier, Grenoble.
- CURIEN N., & MUET, P.-A. (2004). *La société de l'information*. Paris: Conseil d'Analyse Économique.

## D

- DANCHIN E., GIRALDEAU JL. & CEZILLY F. (2005) *Ecologie comportementale : cours et questions de réflexion*. Dunod.
- DARLEY B. (1994). *L'enseignement de la démarche scientifique dans les travaux pratiques de biologie à l'université, analyses et propositions*. Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier, Grenoble.
- DARLEY B. (1996). Exemple d'une transposition didactique de la démarche scientifique dans un TP de biologie en DEUG 2<sup>ème</sup> année. *Didaskalia*, 9, p. 31-56.
- DELEVAY M. (1998) *Eduquer et Former*, Ed. Sciences Humaines.
- DELEVAY M. (2000) *Donner du sens à l'école*. Paris : ESF.
- DE JONG, Y. J., WASER N., & KLINKHAMER P. G. L. (1993) Geitonogamy: the neglected side of selfing. *Trends in Ecology and Evolution* 8, p321-325.
- DE JONG T. & VAN JOOLINGEN W. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, n° 68, p. 179-202.
- DE JONG T. (2006) Computer simulations: Technological Advances in Inquiry Learning. *Science* 28, 312, p. 532-533.
- D'ESPAGNAT, B. (1979) *À la recherche du réel, le regard d'un physicien*. Paris : Gautier-Villard, Bordas.
- DE VECCHI, G. & CARMONA-MAGNALDI, N. (2002). *Faire vivre de véritables situations-problèmes*. Paris : Hachette.
- DE VRIES, E. (2001). Les logiciels d'apprentissage : panoplie ou éventail? *Revue Française de pédagogie*, n° 137, p. 105-116.

- DE VRIES E., BAILLÉ J. & GERONIMI A. (2006) Quelles situations pour l'introduction de la conception assistée par ordinateur (CAO) en technologie au collège ? in : *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain*, sous la direction de M. Grandbastien et JM. Labat. Lavoisier, Paris.
- DE VRIES E. & BAILLÉ J. (2006). Apprentissage : Référents théoriques pour les EIAH. In M. Grandbastien & J.-M. Labat (Eds.), *Environnements Informatiques et Apprentissages Humains*. Paris : Hermès, collection IC2.
- DEWEY J. (1993). *Logique : la théorie de l'enquête*. Paris : PUF (première édition 1938).
- DEWEY J. (1968) *Expérience et éducation*. Paris: Armand Colin (première édition 1938).
- DIECKMANN U. et DOEBELI, M. (1999) On the origin of species by sympatric speciation. *Nature* 400, p354-357.
- DILLON, A., & GABBARD, R. (1998). Hypermedia as an Educational Technology : a review of the quantitative research literature on learner comprehension. *Review of Educational Research*, 68(3), 322-349.
- DURRETT R. & LEVIN S. (1996) Spatial models for the species-area curve. *Journal of Theoretical Biology* 179, p119-127.
- DUVAL R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine, registres sémiotiques et apprentissage intellectuels*. Berne : Peter Lang.
- DYER AG., WHITNEY HM., ARNOLD SE., GLOVER BJ. & CHITTKA L. (2006) Behavioural ecology: bees associate warmth with floral colour. *Nature* 3, 442 (7102) p.525.

## F

- FISHBEIN M. & VENABLE DL. (1996) Evolution of inflorescence design : theory and data. *Evolution*, 50 (6), p 2156-2177.
- FILLON, F. (2004, 28/09/04). Intervention du ministre lors de la conférence de presse sur la vie étudiante. Retrieved 10/10/2004, from <http://www.education.gouv.fr/actu/element.php?itemID=2004928951>
- FORESTAL C. (1991) Quelques réflexions sur l'approche systémique et ses applications en didactique des langues étrangères. In *Introduction à la recherche scientifique en Didactique des Langues, collection Essais, Didier/CREDEF*. p. 217- 231.
- FRANZ S. & NEY-NIFLE M. (1995) *On chaos in mean-field spin glasses*. J. Phys. A, 28, p2499.
- FRETWELL S. D. & LUCAS H. J. (1970) On territorial behaviour and other factors influencing habitat distribution in burds. *Acta Biotheoretica* 19 p16-36.

## G

- GALIANA B. (2002) *L'approche expérimentale en biologie : améliorer sa pratique d'enseignant*. Educagri éditions : Dijon.

- GENZLING J.-C. & PIERRARD M.-A. (1994). La modélisation, la description, la conceptualisation, l'explication et la prédiction. In Equipe INRP/LIREST. *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP. p. 127-133 et la discussion par J. Guichard, p. 79-84.
- GERITZ, S. A. H., METZ, J. A. J., KISDI, E. & MESZENA, G. (1997) The dynamics of adaptation and evolutionary branching. *Physical Review Letters* 78, p2024-2027.
- GODFRAY, H.C.J. (1994) *Parasitoids: Behavioral and evolutionary ecology*. Princeton University Press, Princeton.
- GOODING D. (1992) The procedural Turn ; or, why do thought experiment work ? Cognitive models of science. *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, volume 15. Ronald N. Giere (ed.) Minneapolis: University of Minnesota Press.
- GOTELLI N.J. & GRAVES G.R. (1996) *Null models in ecology*. Smithsonian institution press: Washigton and London.
- GROSS L. (1992). *Workshop on quantitative sciences: curriculum for life science students*. Tennessee: Knoxville. Février 6-8. Summary report.
- GUERRIEN B. (1995) *La Theorie des Jeux*. Economica, 2<sup>ème</sup> edition.

## H

- HACKING I. (1989). *Concevoir et Expérimenter*. Paris : Bourgeois.
- HARDER, L. D. & BARRETT S. C. H. (1996) Pollen dispersal and mating patterns in animal-pollinated plants. In: Llyod D. G. & Barrett S. C. H. (eds) *Floral biology: Studies on Floral Evolution in Animal-Pollinated Plants*. Chapman & Hall, New York, p140-190.
- HARTE J. , KINZIG A. & GREEN J. (1999) Self-similarity in the distribution and abundance of species. *Science*, 284, p334.
- HERRIGEL E. (1998) *Le zen dans l'art chevaleresque du tir à l'arc*. Collection l'être et l'esprit. Dervy. (première édition 1948).
- HILBORN R. & MANGEL M. (1997). *The ecological detective: confronting models with data*. Monographs in population biology. Princeton: Princeton University Press.
- HMELO, C. E., HOLTON, D. H. & KOLODNER, J. L. (2000). Designing to learn about complex systems. *The Journal of the Learning Sciences* 9, p247-298.
- HOFSTEIN A. & LUNETTA VN. (2003) The laboratory in science education: foundations for the twenty- first century. *Science Education* 88, p28-53.

## J

- JOHNSON B. J. (1995). Applying Computer Simulation Models as Learning Tools in Fishery Management. *North American Journal of Fisheries Management*, n° 15, p. 736-747.

## K

- KAWASAKI T. (1979) Time evolution of a magnetic binary alloy. *Prog Theor Phys* 61,

p384-400.

- KLAHR D. & K. DUNBAR (1988) Dual space search during scientific reasoning". *Cognitive Science* 12 (1988).
- KEASAR T., NEY-NIFLE M. & MANGEL M. (2000) Evidence for learning of visual host-associated cues in the parasitoid wasp *Trichogramma thalense*. *Israel Journal of Zoology*, 46, p243
- KEASAR T., NEY-NIFLE M., MANGEL M. & SWEZEY S. (2001) Early oviposition experience affects patch residence time in a foraging parasitoid. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 98, p123.
- KERR G. (2005). BAIT: Bacteria – Antibiotic Interaction Tool. *ERCIMS news*, n°60.
- KESTEMAN JP. (2004) L'un, le multiple et le complexe. L'université et la transdisciplinarité. *RES ACADEMICA* 22, no. 1.
- KOLB D.A. (1984). *Experiential learning, experience as the source of learning and development*. Prentice Hall: Englewood Cliffs, NJ.

## L

- LEBRUN M. (2002). *Théories et méthodes pédagogiques pour enseigner et apprendre : quelle place pour les TIC dans l'éducation ?* Bruxelles : De Boeck.
- LEBRETON J.-D. (1973). *Introduction aux modèles mathématiques de la dynamique de population*. Paris : Informatique et Biosphère.
- LEGAY J.-M. (1973). *La méthode des modèles, état actuel de la méthode expérimentale*. Paris : Informatique et Biosphère.
- LEGAY J.-M. (1997). *L'expérience et le modèle : un discours sur la méthode*. Versailles : INRA éditions.
- LEGAY J.-M. (2000). L'informatique et les sciences de la vie. *Encyclopedia Universalis*.
- LEGAY J.-M. & SCHMID A.-F. (2004). *Philosophie de l'interdisciplinarité. Correspondance (1999-2004) sur la recherche scientifique, la modélisation et les objets complexes*. Paris : Éditions PETRA.
- LETT C. *Modélisation et simulation de la dynamique des écosystèmes forestiers : des modèles agrégés aux modèles individuels spatialisés*. Thèse de doctorat de l'université Louis Pasteur, Strasbourg.
- LEVEQUES (1997) *La biodiversité*. Collection Que Sais-Je. Presses Universitaires de France, Paris.

## M

- MAISCH C. (2006) *Conception d'un outil de classification et d'un outil de scénarisation de TP*. Mémoire de master recherche en didactique des sciences de l'université Joseph Fourier, Grenoble.
- MACARTHUR R. & WILSON E.O. (1967) *The theory of Island biogeography*. Princeton University Press. Princeton.
- MACEDO-ROUET M., CHARLES S., NEY M., BATIER C., HUMBLLOT L., MARQUEZ E. &

- LALLICH-BODOIN G. (2006) Un dispositif Web pour l'enseignement des mathématiques à l'université : quels impacts sur la performance et la motivation des étudiants ? *STICEF*, 13, mis en ligne le 10/04/2006, <http://sticef.org>.
- MANGEL M. & CLARK C. W. (1988) *Dynamic Modeling in Behavioral Ecology*. Princeton University Press.
- MARTINAND J.-L. (1992). Texte du coordinateur. In Equipe INRP/LIREST. *Enseignement et apprentissage de la modélisation en science*. Paris : INRP.
- MARTINAND J.-L. (1994). Quels enseignements peut-on tirer des travaux dans la perspective du développement de curriculum ? In Equipe INRP/LIREST. *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP. p. 127-133.
- MASON L. (2005) On warm conceptual change : The role of personal epistemology in knowledge re-structuring. *Actes de la conférence EARLI (European Association for Research on Learning and Instruction), Chypre, août 2005*.
- MAULINI, O. (2001). *La communication scolaire : techniques, ruses et institution du questionnement. Intervention pédagogique et sociologie critique*. Texte d'une communication dans le module "Socialisation et éducation" du Congrès de la Société suisse de sociologie : "Théories et interventions". Genève, 19-22 septembre 2001. <http://www.unige.ch/fapse/SSE/teachers/maulini/scolarisation-tic.html>
- MAZUR E. (1997) *Peer Instruction: A User's Manual* Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- MAY R. M. (1974) Biological Populations with Nonoverlapping Generations: Stable Points, Stable Cycles, and Chaos. *Science* 15, 186, p645-647.
- MAYES, D. K., SIMS, V. K., & KOONCE, J. M. (2001). Comprehension and workload differences for VDT and paper-based reading. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 28, 367-378.
- MAYNARD SMITH, J. (1982) *Evolution and the theory of games*. Cambridge University Press, Cambridge.
- MOHER, T. (2006). Embedded Phenomena: Supporting Science Learning with Classroom-sized Distributed Simulations. *Proceedings ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI 2006) (April 2006, Montreal, Canada)*. In press (Best Paper award).
- MONTAGUE P.R., DAYAN P., PERSON C. et SEJNOWSKI T.J. (1995) Bee foraging in uncertain environments using predictive hebbian learning. *Nature* 377, p725.
- MORIN E. (1997) Communication au Congrès International "Quelle Université pour demain ? Vers une évolution transdisciplinaire de l'Université " (Locarno, Suisse, 30 avril - 2 mai 1997) ; texte publié dans *Motivation*, N° 24, 1997.
- MOTRO U. & SHMIDA A. (1995) Near-Far Search: An Evolutionarily Stable Foraging Strategy. *J. theor. Biol.* 173, p. 15-22.

## N

- NADAL J.-P. (1993) *Réseaux de neurones : de la physique à la psychologie* Armand Colin (repris par Dunod/Masson).

- NEY M., & CHARLES S. (2003). « Les étudiants en premier cycle à l'Université des Sciences : Innover pour motiver ». *Actes du colloque annuel AIPU 2003*, Sherbrook, Canada, mai 2003.
- NEY M., NIFLE R., CHARLES S., MACEDO-ROUET M., BATIER. C. & HUMBLLOT L. (2004). Approche méthodologique pour faire évoluer la pédagogie en TD vers un apprentissage actif soutenu par des TICE. *Actes du colloque annuel AIPU (Association Internationale de Pédagogie Universitaire)*, Marrakech, Maroc, mai 2004.
- NEY M., MACEDO-ROUET M., CHARLES S. & LALLICH-BODOIN G. (2005). Are well-designed Web sites efficient for learning mathematics at the undergraduate level ? *Actes de la conférence EARLI (European Association for Research on Learning and Instruction)*, Chypre, août 2005.
- NEY M. (2006) Une typologie des fonctions des modèles formels : l'exemple de la biologie *Aster n°43, modélisation et simulation*. Numéro coordonné par Maryline Coquidé et Jean-François Le Maréchal, p109-138.
- NEY-NIFLE M. & HILHORST H.J. (1995) Chiral and spin order in the 2D +/- J XY spin glass: domain wall scaling analysis. *Phys. Rev. B*, 51, p8357.
- NEY-NIFLE M. & YOUNG A.P. (1997) Chaos in a two-dimensional spin glass. *J. Phys. A*, 30, p5311.
- NEY-NIFLE M. (1998) Chaos and universality in a four-dimensional spin glass. *Phys. Rev. B*, 57, p492.
- NEY-NIFLE M. & KEASAR T. (1998) Bumblebees in a changing world: laboratory experiment on color and location learning. *Foraging '98 conference abstracts*, Santa Cruz, CA, USA.
- NEY-NIFLE M. & MANGEL M. (1999) Species-area curves based on geographic range and occupancy. *J. Theo. Biology*, 196, p327.
- NEY-NIFLE M. & MANGEL M. (2000) Habitat loss changes the species-area relationship. *Conservation Biology*, 14, p893.
- NEY-NIFLE M. (2001) A first game theory model for contest behavior in parasitoids. Proceedings des résumés du workshop sur les modèles mathématiques et statistiques en écologie, organisé par M. Mangel, Université de Californie, Santa Cruz, USA.
- NEY-NIFLE M., KEASAR T. & SHMIDA A. (2001) Location and color learning in bumblebees in a two-phase conditioning experiment. *Journal of Insect Behavior*, 14, p697.
- NEY-NIFLE M., BERNSTEIN C., REBORDA J. & KACELNIK A. (2005) Population dynamics and avian brood parasitism: persistence and invasions in a three species system. *Journal of Animal Ecology*, 74, p274.
- NEY-NIFLE M., EPINAT G. & TILL-BOTTRAUD I. (à soumettre) An adaptative dynamics approach of a plant dilemma: more or larger inflorescences?
- NICOLESCU B. (1996) *La transdisciplinarité, manifeste*, Monaco, Editions du Rocher, Collection Transdisciplinarité.
- NIELSEN, J. (2000). *Designing Web Usability*. Indianapolis: New Riders Publishing.
- NIFLE M. (1992) *Corrélations chaotiques dans des systèmes désordonnés et frustrés*.

Thèse de doctorat de l'Université Paris-Sud, Orsay.

- NIFLE O. (1995) *Pour une compréhension de l'entreprise : construction de types cohérents de représentations*. Thèse de doctorat en sociologie de l'université Paris IV Sorbonne.
- NIFLE R. (1986). *Au coeur du sujet : la théorie de l'instance et des cohérences*. Brassac : Éditions de Poliphile. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com> (consulté le 5 juin 2006).
- NIFLE R. (1994). *Le sens*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com> rubrique « fondamental » (consulté le 5 juin 2006).
- NIFLE R. (2004a). *Interdisciplinarité et transdisciplinarité*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com> rubrique « recherche et développement » (consulté le 5 juin 2006).
- NIFLE R. (2004b). *La science et l'art comme re-présentations de l'expérience humaine*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com> rubrique « fondamental » (consulté le 5 juin 2006).
- NIFLE R. (2004c). *Cité macropédagogique : plate-forme d'enseignement et de formation*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com> rubrique « recherche et développement » (consulté le 5 juin 2006).
- NOTT M. (1996) When the black box springs open : practical work in schools and the nature of science. *Int J Sci Edu* 18,7, p807-818.
- NOVAK, J.D. (1991). Clarify with concept maps: A tool for students and teachers alike. *The Science Teacher*, 58(7), p45-49.

## O

- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie : quels apprentissages pour le lycée ?* Paris : PUF.
- ORANGE C. (2005). *Problème et problématisation dans l'enseignement scientifique*. ASTER n°40.

## P

- PAJOT S. (2001). *Percolation et Economie*. Thèse de Doctorat de l'université de Nantes, Nantes. Disponible sur Internet : <http://percolation.free.fr> (consulté le 5 juin 2006).
- PAPERT S. & HAREL I. (1991) *Constructionism*. Ablex Publishing Corporation.
- POTTERS M., CONT R. & BOUCHAUD J-P. (1998) Financial Markets as Adaptive Systems *Europhys. Lett.*, (3), pp. 239-244.
- PROVINE W. (2005) *Trends in Ecology and Evolution* 20, pp. 411.

## R

- RAUCENT B., VANDER BORGHTE C., DE THEUX M.-N., JACQMOT C, MILGROM E, WOUTERS P. (2004) Devenir ingénieur par apprentissage actif. Compte-rendu d'innovation. *Didaskalia*, pp. 81-101.

- REBOUL O. (1989) *La philosophie de l'éducation*, Presse Universitaires de France, Paris, Que sais-je ? n° 2441.
- REGÉ COLET, N. (2002). Enseignement universitaire et interdisciplinarité - Un cadre pour analyser, agir et évaluer. De Boeck, Bruxelles.
- ROSENZWEIG, M. (1995) *Species diversity in space and time*. New York : Cambridge University Press.
- RUMELHARD G. (1994). Spécificité et difficulté de l'apprentissage de la modélisation en biologie. In Equipe INRP/LIREST. *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP. p. 127-133.

## S

- SAVELSBERGH, E. R., DE JONG, T., & FERGUSON-HESSLER, M. G. M. (2000). Learning physics with a computer algebra system. *Journal of Computer Assisted Learning*, 16, 229-242.
- SCAPIN, D. L., & BASTIEN, J. M. C. (1997). Ergonomic criteria for evaluating the ergonomic quality of interactive systems. *Behavior & Information Technology*, 16(4/5), 220-231.
- SCARDAMALIA, M. & BEREITER, C. (1994) Computer support for knowledge-building communities. *The Journal of the Learning Sciences*, 3(3) p265-283.
- SCHOMMER, M. (1990). Effects of beliefs about the nature of knowledge in comprehension. *Journal of Educational Psychology*, 82, 498-504.
- SCHULTZ W., DAYAN P. & MONTAGUE P.R. (1997) A Neural substrate of prediction and reward. *Science*, 275: 5306, p1593-1599.
- SÉRÉ MG. (2002) Towards renewed research questions from the outcomes of the European project labwork in science education. *Science Education* 86.
- STEPHENS D. W. & KREBS J. R. (1986) *Foraging Theory*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey.
- SKOGSMYR, I. & LANKINEN A. (2002) Sexual selection: an evolutionary force in plants? *Bio. Rev.* 77, p. 537-562.
- SWELLER, J. (1994). Cognitive load theory, learning difficulty and instructional design. *Learning and Instruction*, 4 , 295-312.

## T

- TIBERGHIE, A., VEILLARD, LE MARECHAL, J-F, BUTY, C. & MILLAR, R.H. (2001). An analysis of labwork tasks used in science teaching at upper secondary school and university levels in several European countries. *Science Education*, 85, 483-508.
- TIBERGHIE, A., & VINCE, J. (2004). Études de l'activité des élèves de lycée en situation d'enseignement de la physique. *Cahiers du Français Contemporain*, ENS Editions, 10 (numéro coordonné par V. Pugibet et N. Gettliffe-Grant).
- TREGENZA, T. (1994) Common misconceptions in applying the ideal free distribution. *Anim. Behav.* 47, p485-487.

- TURLINGS TCJ, WACKERS, FL., VET, LEM., LEWIS, J. & TUMLINSON, JH. (1993) Learning of host-finding cues by Hymenopterous parasitoids. In : *Insect learning : ecological and evolutionary perspectives*. New York : Chapman & Hall.
- TVERSKY B., BAUER MORRISON J. & BETRANCOURT M. (2002). Animation : can it facilitate ? *Int. J. Human-Computer Studies*, n° 57, p. 247-262.

## V

- VARENNE F. (2005). Les notions de métaphore et d'analogie dans les épistémologies des modèles et des simulations. *Compte-rendu du séminaire externe d'épistémologie de l'équipe de recherche STOICA* (Savoirs, Techniques, Organisation, Innovation, Conception Appliqués, équipe du Centre des humanités de l'INSA de Lyon).
- VAN JOOLINGEN W.R., DE JONG T., LAZONDER A.W., SAVELSBERGH E.R. & MANLOVE S. (2005). Co-Lab : research and development of an online learning environment for collaborative scientific discovery learning. *Computers in Human Behavior*, n° 21, p. 671-688.
- VISSER M.E., VAN ALPHEN J.J.M. & HEMERIK L., (1992) Adaptive superparasitism and patch time allocation in solitary parasitoids: an ESS model. *Journal of Animal Ecology* 61, p. 93-101.
- VOSS, J. F., & WILEY, J. (2000). A case study of developing historical understanding via instruction: The importance of integrating text components and constructing arguments. In P. Stearns, S. Wineburg & P. Seixas (Eds.), *Knowing, Teaching and Learning in History* (pp. 375-389). New York: NYU Press.

## W

- WAJEMAN C., GIRAULT I., d'HAM C., NEY M. & SANCHEZ E. (2005) Analysing experimental design tasks in scientific labwork. *Actes de la conférence ESERA (European Science Education Research Association)*. Espagne, août 2005.
- WATSON, B., KIM, J., MCEANEANY, T., MOHER, T., HINDO, C., & GOMEZ, L. (2004). *StorySpace: Technology Supporting Reflection, Expression and Discourse in Classroom Narrative*. Proceedings IEEE Computer Graphics and Applications 24(2).
- WEIL-BARAIS A. & LEMEIGNAN G. (1994). Approche développementale de l'enseignement et de l'apprentissage de la modélisation. In Equipe INRP/LIREST. *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP. p. 85-113.
- WEISBUCH G. (1989) *Dynamique des systèmes complexes: une introduction aux réseaux d'automates*. Collection Savoirs Actuels, InterEditions/Editions du CNRS. Paris.
- WEISBUCH G., KIRMAN A. & HERREINER D. (2000) Market organization and trading relationships *The Economic Journal*, p 411-436.
- WINFREE, R (1999) Cuckoos, cowbirds and the persistence of brood parasitism. *Trends in Ecology and Evolution* 14(9) p338-343.
- WRIGHT, S. (1982) Character change, speciation, and the higher taxa. *Evolution* 36, p427-443



## Liste de publications

*Le nombre de fois où un article a été cité est indiqué à gauche  
(web of science® novembre 2006).*

### Modélisation en sciences expérimentales

Articles de revues ou proceedings avec comité de lecture :

- 1 NIFLE M. et HILHORST H.J. (1991) Memory effects in the dynamic response of a random two-spin Ising system. *Journal de Physique*, 11, p63.
- 8 NIFLE M. et HILHORST H.J. (1991) Zeros on the temperature axis of spin correlations in a random Ising chain. *Journal of Physics A*, 24, p2397.
- 1 NIFLE M. et HILHORST H.J. (1992) The spiralling self-avoiding walk in a random environment *Journal of Physics A*, 25, p285.
- 1 NIFLE M. (1992) Spiralling self-avoiding walk and chaotic correlations. *Physica A*, 185, p154.
- 47 NIFLE M. et HILHORST H.J. (1992) A new critical exponent and new scaling laws for short-range Ising spin glasses. *Physical Review Letters*, 68, p2992.

---

Thèse soutenue sur la base des travaux cités ci-dessus :

NIFLE M. (1992) *Corrélations chaotiques dans des systèmes désordonnés et frustrés.*  
Thèse de doctorat de l'Université Paris-Sud, Orsay, avril 1992.

- 
- 18 NEY-NIFLE M. et HILHORST H.J. (1993) Chaos exponents in spin glasses. *Physica A*, 193, p48.
  - 5 NEY-NIFLE M. et HILHORST H.J. (1993) Renormalization theory and chaos exponents in random systems. *Physica A*, 194, p462.
  - 8 NEY-NIFLE M., HILHORST H.J. et MOORE M.A. (1993) Chiral and spin correlation functions in a random bond XY ladder. *Physical Review B*, 48, p10254
  - 10 NEY-NIFLE M. et HILHORST H.J. (1995) Chiral and spin order in the 2D +/- J XY spin glass: domain wall scaling analysis. *Physical Review B*, 51, p8357
  - 2 NEY-NIFLE M. et Gabay M. (1995) Thermal fluctuations in layered d-wave superconductors. *Physica C*, 250, p349.
  - 13 FRANZ S. et NEY-NIFLE M. (1995) On chaos in mean-field spin glasses. *Journal of Physics A*, 28, p2499.
  - 3 THILL M., NEY-NIFLE M. et HILHORST H.J. (1995) Chiral and continuous symmetry of an XY spin glass on a tube lattice. *Journal of Physics A*, 28, p4285.

- 1 NEY-NIFLE M. (1996) Chiral and spin order in XY spin glasses. *Physica A, Conference proceedings "complex behavior of glassy systems"* Espagne.
- 23 NEY-NIFLE M. et YOUNG A.P. (1997) Chaos in a two-dimensional spin glass. *Journal of Physics A*, 30, p5311.
- 20 NEY-NIFLE M. (1998) Chaos and universality in a four-dimensional spin glass. *Physical Review B*, 57, p492.
- 29 NEY-NIFLE M. et MANGEL M. (1999) Species-area curves based on geographic range and occupancy. *Journal of Theoretical Biology*, 196, p327.
- 23 NEY-NIFLE M. et MANGEL M. (2000) Habitat loss changes the species-area relationship. *Conservation Biology*, 14, p893.
- 2 KEASAR T., NEY-NIFLE M. & MANGEL M. (2000) Evidence for learning of visual host-associated cues in the parasitoid wasp *Trichogramma thalense*. *Israel Journal of Zoology*, 46, p243.
- 5 KEASAR T., NEY-NIFLE M., MANGEL M. & SWEZEY S. (2001) Early oviposition experience affects patch residence time in a foraging parasitoid. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 98, p123.
- 2 NEY-NIFLE M., KEASAR T. et SHMIDA A. (2001) Location and color learning in bumblebees in a two-phase conditioning experiment. *Journal of Insect Behavior*, 14, p697.
- NEY-NIFLE M., BERNSTEIN C., REBORDA J. et KACELNIK A. (2005) Population dynamics and avian brood parasitism: persistence and invasions in a three species system. *Journal of Animal Ecology*, 74, p274.
- CASTELO M. K., NEY-NIFLE M., CORLEY J. C. et BERNSTEIN C. (2006) Oviposition height increases parasitism success by *Mallophora ruficauda* (Diptera: Asilidae) *Behavioral Ecology and Sociobiology* 61, p.231–243.
- AMAT A., NEY-NIFLE M. et BERNSTEIN C. (à soumettre) An ecological perspective for the coexistence of sexual and asexual competitors in a fragmented environment.
- NEY-NIFLE M., EPINAT G. et TILL-BOTTRAUD I. (à soumettre) An adaptative dynamics approach of a plant dilemma: more or larger inflorescences?

## Apprentissage avec les technologies

Articles de revues ou proceedings avec comité de lecture :

CHARLES S., NEY M., MOUCHIROUD D., HUMBLLOT L., et BATIER C. (2003). Un site web pour l'enseignement inter-disciplinaire des Mathématiques en Biologie. *Proceedings de la Conférence EIAH 2003 (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain)*, Strasbourg.

WAJEMAN C., GIRAULT I., d'HAM C., NEY M., SANCHEZ E. (2005) Analysing experimental design tasks in scientific labwork. *Actes de la conférence ESERA (European Science Education Research Association)*. Espagne, août 2005.

NEY M., MACEDO-ROUET M., CHARLES S. & LALLICH-BODOIN G. (2005). Are well-designed Web sites efficient for learning mathematics at the undergraduate level ? *Actes de la conférence EARLI (European Association for Research on Learning and Instruction)*, Chypre, août 2005.

MACEDO-ROUET M., CHARLES S., NEY M., BATIER C., HUMBLLOT L., MARQUEZ E. et LALLICH-BODOIN G. (2006) Un dispositif Web pour l'enseignement des mathématiques à l'université : quels impacts sur la performance et la motivation des étudiants ? *STICEF*, 13, mis en ligne le 10/04/2006, <http://sticef.org>.

NEY M. (2006) Une typologie des fonctions des modèles formels : l'exemple de la biologie. *Aster n°43, modélisation et simulation*. Numéro coordonné par Maryline Coquidé et Jean-François Le Maréchal, p109-138.

Articles de conférence pour proceedings sans comité de lecture :

NEY M., et CHARLES S. (2003). Les étudiants en premier cycle à l'Université des Sciences : Innover pour motiver. *Actes du colloque annuel AIPU (Association Internationale de Pédagogie Universitaire)*, Sherbrook, Canada, mai 2003.

NEY M., NIFLE R., CHARLES S., MACEDO-ROUET M., BATIER. C. ET HUMBLLOT L. (2004). Approche méthodologique pour faire évoluer la pédagogie en TD vers un apprentissage actif soutenu par des TICE. *Actes du colloque annuel AIPU Marrakech, Maroc*, mai 2004.