

Une typologie des fonctions des modèles formels : l'exemple de la biologie

Muriel Ney, laboratoire Leibniz, CNRS, Grenoble; muriel.ney@imag.fr

Une typologie des fonctions des modèles est construite à partir d'un cadre théorique (Nifle) permettant de définir le rapport entre modèle et expérience. Il est admis 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 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. Nous obtenons une fonction du modèle, pour indiquer, pour laquelle nous proposons une pédagogie expérientielle. Un état des lieux de l'enseignement de la modélisation en biologie à l'université est également présenté ainsi que des exemples de modèles.

Nous proposons quelques définitions servant de point de départ à cette étude. Il ne s'agit pas de définitions universelles mais du sens dans lequel ces termes sont employés dans cet article. Le fil conducteur et la structure générale de l'article 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 (par exemple en biologie), en didactique et en épistémologie. Aussi, il est utile de préciser ce que l'on entendra par ces termes dans un article qui prétend emprunter à ces trois disciplines.

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, p. 112). 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.

Si, 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, voir Legay, 1973), on se focalisera ici sur ceux qui reposent sur les outils mathématiques, statistiques ou informatiques. Nous emploierons le raccourci *modèles formels* pour les désigner dans cet article. 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). Il s'agit donc de modèles qui rendent compte de l'expérience.

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. Formaliser dans le but d'étudier le fonctionnement, bien souvent la dynamique, du système biologique peut se faire par le biais du langage mathématique. Nous entendons par *langage formel* non seulement l'écriture mathématique à l'aide d'équations mais aussi le formalisme logique, certains schémas, figures géométriques ou graphiques d'usages dédiés en mathématiques ou en informatique et les algorithmes permettant le calcul numérique.

Qu'est-ce qu'une simulation dans cet article ? Une simulation numérique est utilisée par le biologiste en lien avec un modèle, un modèle dynamique en général. La simulation va résoudre, de manière explicite pour l'utilisateur ou pas, des équations représentant l'évolution du système. De Jong et 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 (un simulateur de vol, une dissection virtuelle, etc.). Dans cet article, nous parlons des simulations de modèles conceptuels dans un sens un peu plus large que d'ordinaire (comme on le verra plus loin avec le tableau 1).

En référence à ses usages dans un cadre pédagogique, on entendra ici par simulation une application, développée avec un outil logiciel ou *web*, faisant des calculs numériques à partir d'un modèle. Une simulation peut parfois être accompagnée d'une animation (un graphique animé sur lequel on peut éventuellement agir). Une simulation est généralement interactive, elle permet de changer des paramètres, de sélectionner des données, de créer des graphes, etc. Plusieurs logiciels permettant de créer ou de faire tourner de telles simulations seront présentés en fonction des 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).

Enfin, on utilisera le mot expérience au sens large pour parler d'une expérience humaine (à caractère pédagogique, scientifique ou autre) et l'on désignera l'expérience scientifique par le terme expérimentation (voir Coquidé [2003] pour une présentation plus élaborée de la polysémie du terme expérience).

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. Puis le point de vue des biologistes qui conçoivent des modèles est présenté (section 2) 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. Un cadre théorique est présenté en section 3 à partir duquel est construite la typologie des fonctions des modèles (section 4). Cette étude théorique aboutit à quatre fonctions des modèles pour celui qui est en situation de résoudre un problème par la modélisation (donc aussi bien pour le professionnel que pour l'étudiant). Ces fonctions des modèles sont de *calculer*, *décrire*, *expliquer* ou *indiquer*.

I. Unité d'enseignement de modélisation en biologie

1.1. Faut-il enseigner la modélisation ?

Cette question revêt de multiples facettes : à quels étudiants enseigner la modélisation ? 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, d'un cours de biologie ou d'un cours de modélisation ? L'étude présentée ici est centrée non pas sur la nature épistémologique mais sur la fonction des modèles (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 faits/théorie. La construction de modèle implique des connaissances théoriques (le modèle, les concepts et les outils qu'il utilise) et des connaissances pratiques (utiliser le modèle pour résoudre des problèmes). Il s'agit bien pour nous de proposer des pistes pour un enseignement de compétences et de connaissances (mais peut-on jamais les dissocier) à des étudiants qui doivent acquérir cette maîtrise.

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-mêmes 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*. 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) ou de la gestion de pêcheries (Johnson, 1995). Dans ces contextes d'expertise, un certain nombre de difficultés peuvent apparaître : les finalités sont multiples et conduisent à des objectifs qui peuvent être peu clairs, voire contradictoires; les lois théoriques ou simplement empiriques, sur lesquelles le modèle est construit, ne sont pas forcément connues; les données peuvent être insuffisantes voire entachées d'erreurs. Les modèles d'expertise (modèles de décision, Legay [1997] et section 2) 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, 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 en biologie (plutôt qu'en physique). Aujourd'hui, aux États-Unis comme en France, ce genre de formation n'est plus (ou pas) systématiquement proposé dès le début d'un cursus universitaire de biologie. Si elle l'est, c'est bien souvent par une équipe de mathématiciens, avec les problèmes que cela pose pour construire d'authentiques situations de biologie. L'enseignement oscille entre deux extrêmes : du centré-mathématiques, où la biologie est un prétexte, au centré-biologie, où les mathématiques sont des recettes.

Doit-il y avoir un cours de mathématiques spécifique aux biologistes et enseigné par les biologistes ? C'est une question encore débattue. L'université Claude-Bernard-Lyon I, est un exemple remarquable à ce titre puisqu'un cours interdisciplinaire mathématiques/biologie, dispensé par les biométriciens (la biométrie regroupe les méthodes quantitatives pour l'étude des phénomènes biologiques) existe depuis sa création par J.-M. Legay au début des années soixante-dix.

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

1.2. 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 et leurs formalisations. 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. Les deux autres activités permettent 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 consistent grossièrement à poser un problème, à analyser ce problème, à le traduire en langage formel (mathématique ou autre), à y répondre par résolution numérique ou formelle et enfin à interpréter les résultats, faire des prédictions ou prendre des décisions. Ainsi, résoudre des équations différentielles (construire un diagramme de phase par exemple) procède bien de la modélisation mais dans un sens très réduit puisque cela ne fait appel qu'à certaines étapes et en réduit d'autres au minimum. Malheureusement, 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 unités d'enseignement (UE) de licence de biologie portant sur la modélisation. Nous en avons trouvé peu, par exemple une UE de l'université Claude-Bernard-Lyon I (document 1) et une autre de l'université Paris-Sud II (document 2).

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 : 15 heures de cours magistraux et 32 heures de travaux pratiques

Source : université Claude-Bernard-Lyon I (http://spiral.univ-lyon1.fr/l4-ue/lecture_UE.asp?choix_UE=305 – consulté le 18 octobre 2006)

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 II

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

Niveau : L2

Parcours : Biologie

Organisation : 50 heures de cours magistraux, 21 heures de travaux dirigés et 8 heures de travaux pratiques

Source : Université Paris-Sud II (<http://www.lmd.u-psud.fr/licence/sts/PDF/Fiches.pdf>
– page 93 – consulté le 18 octobre 2006)

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.

On note à la lecture de ces deux documents que des catégorisations des modèles d'ordre disciplinaire peuvent être faites et sont 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...

Un regard sur la situation aux États-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. Le point de départ en 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 l'anxiété, voire du rejet, suscité par ces cours (un constat similaire est fait par l'auteur à Lyon I). Un ensemble de difficultés clés a été identifié par les professeurs des universités américaines 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 au primaire et au secondaire, Genzling et Pierrard (1994) portent un regard didactique 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, et rapprocher des situations différentes ; (ii) répondre à des questions, et relier des phénomènes à des descripteurs (propriétés, grandeurs, paramètres) ; (iii) tester la validité d'un modèle. D'autres auteurs, en sciences de l'éducation ou en sciences cognitives, vont jusqu'à proposer un mode pédagogique privilégié pour certaines approches de la modélisation (de Jong & van Joolingen, 1998). C'est ce type d'association que nous tenterons de systématiser et de fonder sur une base théorique.

1.3. Options pédagogiques pour l'enseignement de la modélisation

Comme cela est souvent souligné, par exemple par Weil-Barais et 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 & Lemeignan, 1994).

Le but de cet article est de passer en revue certaines des options qui s'offrent à celui qui décide d'enseigner la modélisation en biologie à l'université et de proposer un cadre cohérent permettant de discerner puis de mettre en pratique les liens de parenté entre ces options.

2. Les modèles vus par les scientifiques qui les conçoivent

Dans cette étude, nous nous référons d'abord aux réponses apportées par des biologistes qui conçoivent des modèles à la question de la fonction des modèles au cœur de leur discipline.

On l'a vu auparavant, le modèle est souvent défini comme un trait d'union entre l'esprit et les choses, entre les mathématiques et l'expérience, entre le réel et la théorie, entre un problème concret et sa solution formelle. Orange (1997) présente le modèle comme interface entre registre empirique (comprenant les phénomènes dont le modèle rend compte) et registre explicatif (englobant les éléments permettant de construire différents modèles, de résoudre une classe de problèmes). Il distingue les fonctions heuristiques et explicatives du modèle qui seraient liées au registre explicatif, des fonctions prédictives liées au registre empirique. Ces points de vue nous offrent une vision d'un réel et d'une théorie qui ne demandent qu'à se laisser lier par le modèle, mais comment ?

Ceci renvoie à la question du rapport de précédence entre théorie, modèle et expérience scientifique (Hacking, 1989; Legay & Schmid, 2004). La théorie scientifique se distingue du modèle, quoique de façon pas toujours claire et certains emploient l'un pour l'autre. Disons qu'une théorie est plus générale et explique le fonctionnement d'un ensemble de phénomènes (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 bien d'une situation de départ, faisant appel ou non à des expérimentations (de terrain ou de laboratoire). Hacking (1989) montre, en se basant principalement sur l'histoire des sciences, 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). Pourtant, dans le cadre d'un enseignement universitaire, on peut se demander si la méthode ascendante ne doit pas rester prépondérante. En effet, si modéliser implique de résoudre un problème (Orange, 1997), c'est un problème issu des phénomènes et des situations appréhendables

par les étudiants que l'on partira plutôt que d'un problème de chercheur en biologie.

Lorsque le modèle est envisagé comme un instrument de recherche pour l'expérimentateur, Legay (1997) propose trois types de modèles en fonction de leurs rôles. Notons, tout d'abord, sa définition de l'expérimentation : « 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, nous détaillons sa typologie des fonctions des modèles que nous illustrons sur l'exemple de la dynamique de population et du modèle exponentiel continu qui sera repris en section 4.

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 etc. 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 les 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 modèle sont alors pris en compte.

Le modèle intervient 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). Hilborn et Mangel (1997) définissent un modèle comme

la « *version simplifiée d'une hypothèse* ». L'hypothèse est, selon ces auteurs, une nouvelle proposition (explicative) à tester.

Il semble que tous les types de modèles prédisent ou expliquent quelque chose, alors y a-t-il différents sens des mots prédiction et explication ? De plus, on peut se demander s'il y a un modèle-instrument privilégié selon l'expérience de celui qui modélise, sa vision de la situation ? Nous tenterons de répondre à ces questions dans la section 4.

Envisagé comme un instrument, on ne peut pas dire du modèle qu'il est vrai ou faux (Hilborn & Mangel, 1997). Un stylo n'est ni vrai ni faux, c'est un instrument qui peut servir, entre autres, à écrire, mais 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 3) sujet (intentionnalité), objet (objectivation), projet (projection) : un projet de modélisation résulte du rapport entre un sujet et un objet qui fait problème au 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.

3. 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 4, dans un cadre théorique que nous allons 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, dans le document 3, le sens plus précis dans lequel nous les utiliserons pour notre analyse.

Document 3. Définitions : modèle et expérience

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 (et l'on verra que cette expérience peut parfois être essentiellement d'ordre sensible ou factuel ou mental).

Une approche permettant de comprendre le rapport modèle-expérience a été développée par la théorie du sens et des cohérences humaines (Nifle, 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 & Baker, 2005), les sciences de l'éducation (Condette, 1984), la sociologie (Nifle, 1995), la didactique des langues (Forestal, 1991). En didactique des sciences expérimentales, Maisch et Ney ont utilisé cette approche (Maisch, 2006) afin d'analyser des pratiques enseignantes, dans les travaux pratiques 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 et sont liés 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. 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 pour clarifier cela : une simulation (on parle aussi d'expérimentation virtuelle) est une re-présentation d'un modèle, tout comme peut l'être une expérimentation de laboratoire quand elle se base sur un modèle. 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 ces re-présentations partagent un sens commun (par homologie). Dans l'exemple ci-dessus, une expérimentation est re-présentée par un modèle qui est ensuite re-présenté par une autre expérimentation ou une simulation pouvant à son tour être re-présentée successivement par un modèle verbal puis un modèle formel.

Selon Nifle (2004a), 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, dans cet article, un ensemble de phénomènes 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, Legay, 1997 et section 2). 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 nous semble proche de notre cadre théorique, 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* ». Pour Bousquet (2001), « *l'objet modèle étant réalisé, il va être utilisé à des fins de représentation (re-présentation) de situations/.../ Je représente (formalise) une représentation (un point de vue) à des fins de représentation (médiation)* ».

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

- une dimension intentionnelle (sujet) ;
- une dimension objective (objet) ;
- 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. Bachelard, par exemple, note que « *la méditation de l'objet par le sujet prend toujours la forme du projet* » (1934/1995, p. 15).

Les trois composantes de Nifle (2004a) sont :

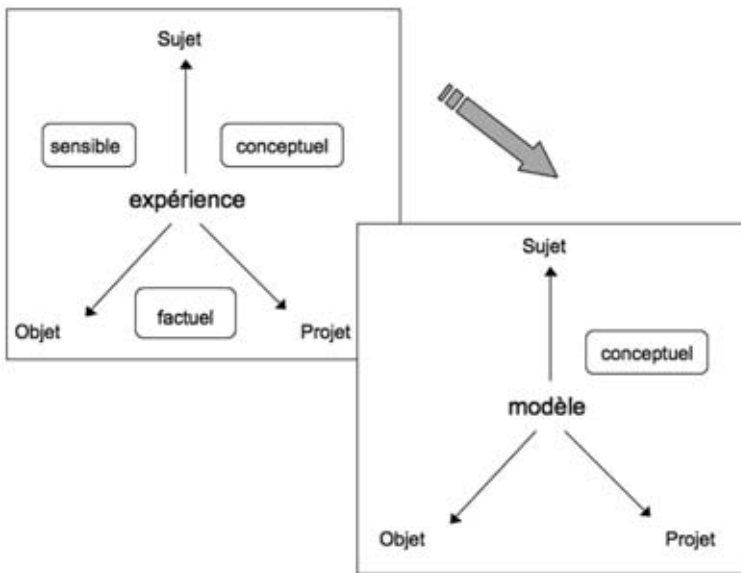
- la composante sensible ou affective (relation sujet-objet). Ce sont le vécu, les appréciations, les perceptions sensibles ;
- la composante factuelle ou matérielle (relation objet-projet). C'est ce qui se produit, ce qui se fait ;
- la composante conceptuelle ou mentale (relation sujet-projet). Ce sont les concepts, les représentations mentales, les projections structurées.

Toute expérience humaine, et donc tout modèle, comporte ces dimensions et ces composantes. Le rapport d'homologie entre expérience et modèle se définit par une combinaison entre une ou plusieurs composantes du modèle et une ou

plusieurs composantes de l'expérience. Par exemple, une composante factuelle du phénomène biologique expérimenté (des faits) peut être re-présentée par une composante conceptuelle du modèle (des équations), ou toute autre combinaison. 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 1). Ainsi, croiser successivement une des trois composantes de l'expérience avec une des trois composantes du modèle donne neuf combinaisons. À cela s'ajoutent des combinaisons multiples, entre plusieurs composantes de l'expérience et plusieurs composantes du modèle.

Figure 1. Le modèle est une re-présentation de l'expérience (humaine)

Modèle et expérience comportent trois composantes et trois dimensions. Seule la composante conceptuelle du modèle est envisagée dans cet article



Dans un modèle formel, tel qu'il est défini ici, c'est la composante conceptuelle qui apparaît au premier plan, même si les autres composantes sont aussi présentes. Plus généralement, la composante conceptuelle du modèle peut être de nature formelle (comme une équation) mais aussi structurelle (comme un schéma) ou analogique (comme une métaphore). D'autre part, un modèle dont c'est la composante factuelle qui apparaît au premier plan est, par exemple, un modèle réduit ou un prototype, tandis que pour la composante sensible ce sera par exemple un modèle situationnel (mise en situation).

Dans cet article, nous n'envisageons que la composante conceptuelle des modèles en biologie, c'est pourquoi seule cette composante a été indiquée sur la figure 1. 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.

4. 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 ?

Quatre fonctions du modèle sont proposées ici (on se reportera au tableau I pour un résumé). 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.

Tableau I. Typologie des fonctions des modèles formels basée sur le rapport modèle/expérience

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

Dans ce qui suit, chaque fonction du modèle est présentée de la même façon. On envisage d'abord l'activité de modélisation dans le contexte d'une recherche appliquée, avec l'exemple de la percolation et des incendies de forêts (voir l'annexe I pour une introduction à ces notions inspirée par un TP de l'UE présentée dans le document I). Dans certains cas nous proposons (comme simple hypothèse, à

ce stade de notre étude) l'option épistémologique de celui qui modélise. C'est enfin l'activité de modélisation dans le contexte de l'enseignement universitaire qui est abordée, avec des éléments sur l'option psychologique, l'option pédagogique et des exemples d'usages des simulations dans ce contexte. Nous espérons ainsi montrer le lien entre toutes les options citées par Weil-Barais et Lemeignan (1994 et section 1.3).

Une illustration, sur l'exemple de la croissance bactérienne, sera déclinée pour chaque partie. Ce thème a été choisi car il nous permet de présenter une innovation pédagogique mise en place à l'université Claude-Bernard-Lyon 1, comme exemple de notre quatrième fonction, *pour indiquer*, des modèles (section 4).

4.1. Calculer : un modèle pour résoudre un problème ou 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, calculer la densité d'arbres au-delà de laquelle le feu se propage, autrement dit la densité critique de percolation (voir annexe 1). Dans cette approche de la modélisation, on va par exemple se centrer sur le développement de méthodes d'approximation pour calculer cette densité critique.

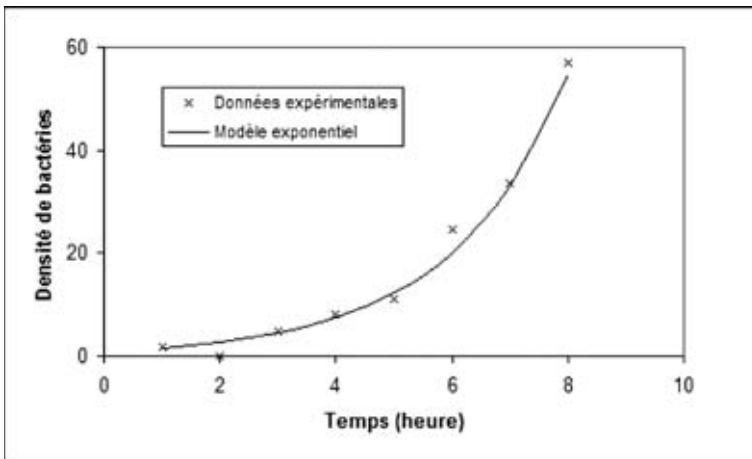
La fonction du modèle est de trouver une solution quantitative à un problème, que ce soit une évaluation ou une prédiction. Modéliser, ici, c'est opérer. On met au point des procédures, des méthodes de calcul et des modèles qui marchent. Ce type de modélisation privilégie la composante factuelle de l'expérience (figure 1) car l'accent est mis sur les faits, les opérations, le monde matériel et l'expérience concrète. On conçoit par exemple des protocoles d'expérimentations réelles ou simulées ayant pour but d'acquérir, stocker, extraire et extrapoler des données quantitatives.

Comment apprend-on dans ce contexte ? L'option psychologique la plus représentative est sans doute le béhaviorisme, 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. Lebrun (2002) rapproche le béhaviorisme du courant épistémologique de l'empirisme (Bernard dans Rumelhard, 1994) de par la primauté de l'expérience et des faits. Martinand parle 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, probablement sur le mode de l'essai-erreur bien souvent employé par les étudiants dans ces cas là (de Jong & van Joolingen, 1998). La fonction principale de la simulation, dans ce cas, est de générer des données, des résultats quantitatifs.

Prenons l'exemple de la croissance d'une population de bactéries déjà évoqué dans la section 2. L'apprenant recueille des données décrivant l'évolution dans le temps du nombre de bactéries dans des colonies (expérimentation 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 constaté. C'est le modèle d'hypothèse de Legay (1997). Modéliser la croissance d'une population consiste à superposer des points expérimentaux et une fonction au plus près (figure 2) pour en déduire une vitesse de croissance, une prédiction sur le futur. 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.

Figure 2. Ajustement d'une courbe exponentielle sur des points expérimentaux



Nous venons donc de croiser la composante factuelle de l'expérience avec la composante conceptuelle du modèle (figure 1). 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 (presser des boutons sous le mode essai-erreur, faire fonctionner la boîte-noire), mais sans but.

4.2. 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 autorisant la propagation directe de l'incendie entre deux zones favorables (annexe 1).

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 (cadre qui permet de concevoir l'expérience scientifique visant à établir ces faits). Modéliser, ici, c'est expliquer par le raisonnement. C'est la conjugaison de la formule de départ, du raisonnement logique et pour finir du résultat mathématique final qui explique le phénomène. Ce type de modélisation privilégie la composante mentale, conceptuelle, de l'expérience (figure 1), les idées, les concepts, les connaissances théoriques. Différents types de représentations sont possibles, la langue maternelle, les graphes, les schémas dynamiques, les formules mathématiques, et ils concourent à expliquer le phénomène (Duval, 1995). La fonction la plus importante est donc ici la fonction de représentation. L'activité de modélisation est une aide à la construction, à l'appropriation d'une représentation nouvelle, à l'élaboration des systèmes de symbolisation nécessaires à la représentation (Martinand, 1992).

Apprendre à modéliser, dans ce contexte, pourrait se traduire dans une conception cognitiviste ou constructiviste de l'apprentissage, car on apprend par construction de connaissances nouvelles situées dans une structure cognitive par rapport aux connaissances antérieures. L'apprentissage se fait quand l'étudiant comprend ce qui se passe, ce que lui disent le modèle et ses différentes représentations, ce que le modèle explique. Selon Lebrun, 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. Elle permet de construire le chemin logique du raisonnement vers les concepts. Elle est centrée sur la mise en équations, en graphes, la mise en relation entre plusieurs représentations, puis la recherche de solutions. Pourtant la mise en équation n'est qu'une partie de la construction du modèle; il y a d'autres objets que les équations qui donnent sens au modèle, comme les paramètres par exemple (Orange, 1997, p. 31).

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. 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 (voir les documents 1 et 2).

Dans l'exemple de la croissance d'une population de bactéries, on proposera aux apprenants de retrouver, comme précédemment, 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 (équation différentielle du modèle exponentiel continu, document 4).

Document 4. Le modèle exponentiel appliqué à une population de bactéries

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

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 Legay (section 2).

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, représentation 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* ».

4.3. 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 (document 3) 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 (la taille du voisinage de combustion) pour constater des changements de *patterns*. Le chercheur développe des simulations, individu-centrée, orientée-objet ou

orientée-agent, qui ne sont pas tant des calculateurs résolvant des équations du modèle (sections 4.1. ou 4.2.), 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 représentation 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 1). 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 introduction) 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. Dans une option naturaliste, on nomme, décrit, classe et organise. 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, p. 130).

Comment apprend-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 animation/simulation et Chomat *et al.* [1992] pour un exemple d'enseignement à l'aide d'une animation).

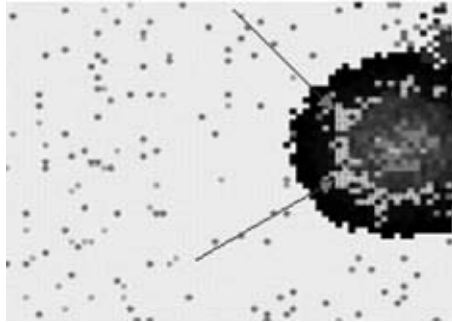
Dans l'exemple des bactéries, on va représenter chaque bactérie par un point et observer la dynamique de ces points à l'écran. Tout est comme si on observait les organismes réels au laboratoire. Il s'agit d'observer l'évolution et la forme des colonies de bactéries, en présence d'antibiotique par exemple (figure 3).

Cette fonction du modèle est le résultat d'un croisement entre la composante sensible de l'expérience et la composante conceptuelle du modèle (figure 1). 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.

Figure 3. Simulation de la croissance d'une population de bactéries

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



4.4. 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 3) :

- une intention (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 et 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 mental). Modéliser, ici, c'est indiquer une direction et donner du sens (section 3). 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 1), 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 véhicule aussi 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 (Lebrun, 2002), l'apprentissage expérientiel (Kolb, 1984), ou bien encore l'apprentissage par investigation (« *inquiry learning* », de Jong & van Joolingen, 1998). Ces trois approches ont en commun de proposer aux étudiants une quête, 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. Par exemple, la plate-forme d'apprentissage par investigation scientifique Co-Lab® (van Joolingen et al., 2005) permet de gérer les aspects conceptuels (outils de modélisation), affectifs (gestion de la collaboration, de la motivation) et factuels (expérimentations réelles filmées et guidées par un robot) de l'expérience (voir aussi le concept de cité macropédagogique, plate-forme de formation, d'enseignement et de recherche dédiée à un thème, Nifle, 2004b).

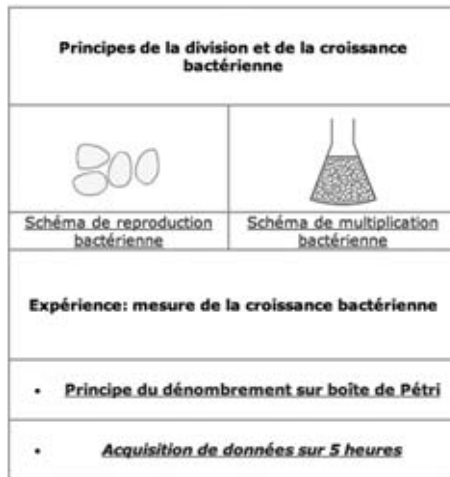
Sur le thème de la croissance d'une population de bactéries, une innovation pédagogique a été mise en oeuvre à l'université Claude-Bernard-Lyon I (Ney et al.,

2004) et fait toujours partie d'une UE de licence I à ce jour. Les étudiants suivent un apprentissage par problème et travaillent sur deux *situations-problèmes* successivement sur un semestre (l'une d'entre elles est présentée en annexe 2).

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 4) et à un ensemble d'aides conceptuelles (cours et exercices en ligne sur le site web MathSV). Une attention particulière est donnée au fait que les animations ne sont efficaces que lorsqu'elles proposent une correspondance directe avec le problème, dans l'espace et dans le temps, et qu'elles sont interactives (Tversky *et al.*, 2002). Dans ce contexte, l'évaluation des progrès des étudiants dans la démarche intellectuelle de modélisation (Weil-Barais & Lemeignan, 1994) se fait au travers des comportements en présentiel et par le biais d'une grille d'évaluation du compte rendu, à l'opposé d'une évaluation des performances qui sommerait des résultats attendus.

Figure 4. Page d'accueil du laboratoire virtuel, issue du site web MathSV

Elle montre la liste de liens vers quatre animations pour l'étude de la croissance d'une population de bactéries (voir aussi document 4).



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 de 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.

5. 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 à 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, comme 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). Il serait intéressant d'analyser le contenu de plusieurs enseignements de modélisation (les documents 1 et 2 et d'autres) en utilisant la typologie proposée.

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 (DeVries, 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... (on pourra lire la thèse de Darley [1994] pour une approche très accessible de l'épistémologie des sciences au travers de l'exemple de la biologie, mais aussi d'Espagnat [1979] et Chalmers [1987]). Ceci fait l'objet d'une recherche en cours menée par un groupe de travail dont l'auteur fait partie.

Comment apprend-on à modéliser, à se servir des modèles ? Cela dépend donc de ce que l'on entend par apprendre. De plus, il est certain que les jeunes étudiants 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 cet article, 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 trouvera une description un peu plus détaillée dans Ney et al., 2004). 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).

L'enseignement de la modélisation formelle en biologie est un enseignement de nature interdisciplinaire au cœur 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 à un phénomène biologique. Pour concevoir des dispositifs pédagogiques d'apprentissage de la modélisation formelle, nous n'avons d'autre choix que de comprendre la nature de ce rapport. ■

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1934). *Le nouvel esprit scientifique*. Paris : PUF.
- BACHELARD G. (1971). *Bachelard, épistémologie*. Textes choisis par Dominique Lecourt. Paris : PUF.
- BACHELARD S. (1979). Quelques aspects historiques des notions de modèle et de justification des modèles. In P. Delattre & M. Thellier (Éd.). *Élaboration et justification des modèles*. Paris : Maloine.
- BESSIRE D. & BAKER R.C. (2005). The french tableau de bord and the american balanced scorecard: a critical analysis. *Critical Perspectives on Accounting*, vol. 16, n° 6, p. 645-664.
- BOUSQUET F. (2001). *Modélisation d'accompagnement, simulations multi-agents et gestion des ressources naturelles et renouvelables*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Claude-Bernard-Lyon 1, Lyon.
- CHALMERS A.F. (1987). *Qu'est-ce que la science ?* Paris : Éd. La Découverte.
- CHOMAT A., LARCHER C. & MÉHEUT M. (1992). Modèle particulière et démarche de modélisation. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et apprentissage de la modélisation en science*. Paris : INRP, p. 119-170.
- COQUIDÉ M. (2000). *Le rapport expérimental au vivant*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, université Paris-Sud 11, Orsay.
- COQUIDÉ M. (2003). Face à l'expérimental scolaire. In J.-P. Astolfi (dir.). *Éducation, 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, université Paris 8 Vincennes-Saint-Denis, Saint-Denis.
- 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 1, Grenoble.
- D'ESPAGNAT B. (1979) *À la recherche du réel, le regard d'un physicien*. Paris : Gautier-Villard : Bordas.
- DE VRIES É. (2001). Les logiciels d'apprentissage : panoplie ou éventail ? *Revue française de pédagogie*, n° 137, p. 105-116.
- DEWEY J. (1993). *Logique : la théorie de l'enquête*. Paris : PUF.
- DUVAL R. (1995). *Sémiosis et pensée humaine*. Berne : Peter Lang.
- 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*. Paris : Didier : CREDIF, p. 217-231.

- GENZLING J.-C. & PIERRARD M.-A. (1994). La modélisation, la description, la conceptualisation, l'explication et la prédiction. In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 127-133.
- GROSS L. (1992). *Workshop on quantitative sciences: curriculum for life science students*. Tennessee : Knoxville. Février 6-8. Summary report.
- HACKING I. (1989). *Concevoir et Expérimenter*. Paris : Bourgeois.
- HILBORN R. & MANGEL M. (1997). *The ecological detective: confronting models with data*. Monographs in population biology. Princeton: Princeton University Press.
- 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.
- JONG (DE) T. & VAN JOOLINGEN W. (1998). Scientific discovery learning with computer simulations of conceptual domains. *Review of Educational Research*, n° 68, p. 179-202.
- KERR G. (2005). BAIT : Bacteria – Antibiotic Interaction Tool. *ERCIMS news*, n° 60.
- KOLB D.A. (1984). *Experiential learning, experience as the source of learning and development*. Prentice Hall : Englewood Cliffs, NJ.
- 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. In *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. (1999). *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 I, Strasbourg.

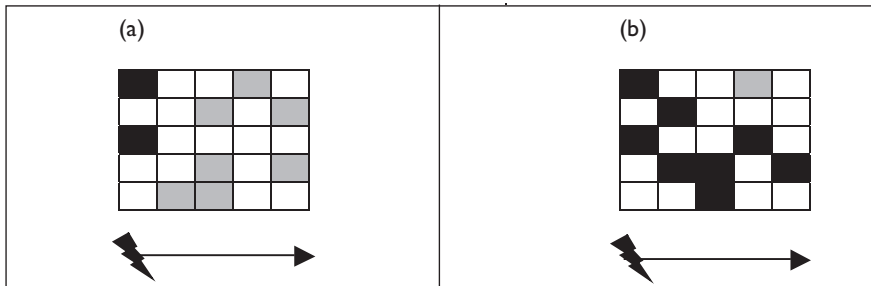
- MAISCH C. (2006) *Conception d'un outil de classification et d'un outil de scénarisation de TP*. Mémoire de master recherche en didactique des sciences, université Joseph-Fourier-Grenoble 1, Grenoble.
- MARTINAND J.-L. (1992). Texte du coordinateur. In J.-L. Martinand (dir.). *Enseignement et apprentissage 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 J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 127-133.
- NEY M., NIFLE R., CHARLES S., MACEDO-ROUET M., BATIER. C. & HUMBLOT 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, 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.
- 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/article.php3?id_article = 208 (consulté le 18 octobre 2006).
- NIFLE R. (1994). *Le sens*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com/article17.html> (consulté le 18 octobre 2006).
- NIFLE R. (1995) *Pour une compréhension de l'entreprise : construction de types cohérents de représentations*. Thèse de doctorat en sociologie, université Paris-Sorbonne-Paris 4, Paris.
- NIFLE R. (2004). *La science et l'art comme re-présentations de l'expérience humaine*. Disponible sur Internet : <http://journal.coherences.com/article68.html> (consulté le 18 octobre 2006).
- NIFLE R. (2004). *Cité macropédagogique : plate-forme d'enseignement et de formation*. Disponible sur Internet : http://journal.coherences.com/article.php3?id_article = 72 (consulté le 18 octobre 2006).
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- PAJOT S. (2001). *Percolation et Économie*. Thèse de doctorat de l'université de Nantes, Nantes. Disponible sur Internet : <http://percolation.free.fr> (consulté le 5 juin 2006).

- RUMELHARD G. (1994). Spécificité et difficulté de l'apprentissage de la modélisation en biologie. In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 127-133.
- TVERSKY B., BAUER MORRISON J. & BETRANCOURT M. (2002). Animation : can it facilitate ? *Int. J. Human-Computer Studies*, n° 57, p. 247-262.
- 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.
- WEIL-BARISA. & LEMEIGNAN G. (1994). Approche développementale de l'enseignement et de l'apprentissage de la modélisation. In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 85-113.

Annexe I. Le modèle de percolation appliqué à la propagation des feux de forêts

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.

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). La dynamique du modèle est la suivante : à chaque pas de temps, le feu (cases noires) 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 se propager de gauche à droite de 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. À 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.

Annexe 2. 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 10 heures.

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 heures ou sur 30 heures) dans le laboratoire virtuel.
- une liste de 20 autres bactéries avec leurs caractéristiques.