



HAL
open science

Rencontre entre deux disciplines scolaires, biologie et mathématiques : première approche des enjeux didactiques de la formation des enseignants de biologie

Jean-Marc Lange

► **To cite this version:**

Jean-Marc Lange. Rencontre entre deux disciplines scolaires, biologie et mathématiques : première approche des enjeux didactiques de la formation des enseignants de biologie. Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education, 2005, 5 (1), pp.485 - 502. 10.1080/14926150509556677 . hal-01699593

HAL Id: hal-01699593

<https://hal.umontpellier.fr/hal-01699593>

Submitted on 2 Feb 2018

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.

LANGE, J.-M. (2005). Rencontre entre deux disciplines scolaires, biologie et mathématiques : première approche des enjeux didactiques de la formation des enseignants de biologie. *Canadian Journal of Sciences, Mathematics and Technologies Education*, Vol. 5, n°4, 485-502.

Rencontre entre deux disciplines scolaires, biologie et mathématiques : première approche des enjeux didactiques de la formation des enseignants de biologie.

Jean-Marc Lange

UMR STEF, ENS Cachan.

IUFM de l'académie de Rouen

Résumé : Le constat d'une formalisation croissante de la biologie, discipline académique, est posé. En contraste, sa faiblesse au niveau de la biologie enseignée dans le secondaire français est constatée. Cet écart se révèle contradictoire avec l'une des missions de toute discipline scolaire qui est de permettre la construction des paradigmes fondamentaux du champ concerné. L'une des causes serait la posture empirico-réaliste constatée chez certains enseignants de sciences. Elle est attribuée à l'influence excessive d'un modèle « bernardien » de la démarche scientifique et à un rapport particulier aux mathématiques, comme le montre l'enquête que nous avons effectuée. Ce rapport se caractérise chez certains d'entre eux par un sentiment d'exclusion à l'origine d'une attitude de rejet des mathématiques. Ce phénomène conduit à un habitus professionnel incompatible avec toute formalisation de la biologie enseignée. La question de la formation des enseignants et des moyens du dépassement de cet obstacle est alors posée.

Sommaire exécutif : Dans cet article, j'aborde la question des relations existant entre les mathématiques et la biologie au niveau académique et de sa transposition possible au niveau de l'enseignement de la biologie dans le secondaire français. Cette réflexion porte sur les acteurs clés de toute évolution du curriculum que sont les enseignants eux-mêmes. Pour cela, une enquête a été effectuée auprès de jeunes enseignants de sciences de la vie et de la Terre en formation professionnelle initiale avec l'objectif de caractériser leur identité professionnelle sur cette question. Les résultats sont ensuite analysés d'un point de vue épistémologique et didactique.

L'enquête montre la perception d'une singularité de la relation maths-biologie par rapport à la situation existant dans les sciences physiques. Si les rôles attribués aux mathématiques sont envisagés dans une certaine diversité, celui, classique, d'outil est majoritaire. La modélisation est, quant à elle, citée un petit nombre de fois. Le plus étonnant est l'existence chez une minorité importante d'entre eux d'une attitude de rejet extrêmement marquée.

Analyser ces résultats nous impose deux détours. Le premier nous amène à effectuer un état des lieux sur cette question d'un point de vue épistémologique. Le second état des lieux concerne l'état de la mathématisation de la biologie académique.

Du point de vue épistémologique, si la référence à Bachelard nous conduit à établir une relation forte et indispensable entre mathématiques et sciences modernes, on trouve chez Canguilhem une position plus nuancée sur la possibilité même d'une interaction forte entre ces domaines. Traditionnellement, depuis Claude Bernard, les sciences de la vie sont considérées comme étant peu « mathématisables ». Les réflexions des épistémologues « de terrain » les conduisent également à des positions contrastées sur cette question. Si certains d'entre eux voient dans l'évolution récente des sciences du vivant une révolution scientifique en cours du fait même de l'irruption des mathématiques dans ces domaines, les biologistes évolutionnistes se positionnent davantage sur l'irréductibilité des sciences de la vie aux mathématiques du fait de leur caractère historique.

Dans le cadre académique, une explosion de la modélisation formelle c'est-à-dire à référent théorique mathématique est facilement constatable par des études d'occurrences sur les bases de données disponibles. Il existe ainsi une grande diversité de mathématiques mobilisées : équations différentielles, dérivées partielles, statistiques et probabilités, fractales...A cette diversité se surajoute une diversité de rôle et de fonction : prédiction, décision,

compréhension, dépassement d'obstacles (discontinuités et non linéarité des phénomènes, variabilité biologique ...).

Si nous revenons à notre enquête, trois attitudes peuvent être caractérisées : volontariste, réservée et hostile. Ces attitudes sont liées à des positions épistémiques spontanées et à un niveau de connaissance mathématique. C'est donc l'identité personnelle et professionnelle qui est convoquée ici et qui se cristallise autour d'un rapport particulier aux mathématiques. L'hostilité manifestée chez une minorité non négligeable des enseignants étudiés peut être expliquée par une posture empirique-réaliste, un sentiment d'exclusion de la cité savante, envisagé en son temps par Bachelard, et par la persistance d'une certaine forme naïve de vitalisme.

L'ensemble de cette réflexion nous conduit à constater une impossibilité épistémologique, du fait de la composante historique de sciences de la vie, et scolaire, du fait du niveau mathématique impliqué le plus souvent dans les modélisations savantes, à mathématiser totalement la biologie enseignée. Pour autant, il convient de briser le cercle vicieux de la reproduction épistémologique scolaire traditionnelle par des approches co-disciplinaires mathématiques et biologiques, par une plus grande familiarisation avec l'approche par modélisation dans le secondaire, par une réflexion historique et épistémologique en formation universitaire et professionnelle. C'est à ce prix que la biologie enseignée ne construira pas d'obstacle identitaire s'opposant à l'évolution de la biologie académique. C'est donc toute une réflexion curriculaire qu'il convient d'engager.

Déclarée année mondiale des mathématiques, sous le patronage de l'UNESCO, l'année 2000 a été un moment privilégié de réflexion et d'analyse sur les interactions existant entre les mathématiques et le développement économique, social et scientifique dont celui de la biologie (Bouletreau, 2000). Nous proposons de continuer ici cette réflexion dans le domaine de l'enseignement de la biologie en nous appuyant sur les acquis de la didactique des sciences.

Les contacts entre deux disciplines scientifiques sont l'occasion d'explicitation des dispositions implicites et sont par là même des terrains privilégiés d'observation et d'objectivation des schèmes pratiques (Bourdieu 2001). Mais contrairement aux relations établies depuis longue date entre mathématiques et sciences physiques, celles qui existent entre biologie et mathématiques ne font pas l'objet d'un consensus. Pour reprendre la terminologie de S. Joshua (1994), cette relation peut relever d'une interdisciplinarité forte, ce qui signifie qu'il y a chevauchement des méthodes et des contenus, ou elle peut relever d'une interdisciplinarité faible, et dans ce cas, la rencontre se fait par l'intermédiaire d'un objet d'étude commun, sans intersection notable. Dans la rencontre étudiée ici, la question de son état faible ou fort, est un élément auquel il convient de réfléchir.

Du point de vue scolaire, cette question renvoie à celles des fonctions des disciplines scolaires, de la nature de leurs relations et à la faisabilité de leur mise en œuvre par les enseignants eux-mêmes. De quels concepts didactiques disposons-nous ?

Selon M. Develay (1994), une discipline scolaire se caractérise par une matrice disciplinaire. Cette conception, adaptée de Kuhn (1983), recouvre l'idée de point de vue porté sur la discipline, l'idée de paradigme (s) fondateur (s), de creuset au sein duquel se structure, se conçoit la discipline et lui donne sa cohérence. La dimension épistémologique d'une discipline scolaire est donc affirmée. Mais elle demande à être précisée et clarifiée.

Les disciplines scolaires peuvent également être envisagées sous l'éclairage du concept de matrice curriculaire élaboré par J. Lebeaume (1999, 2003) à partir de l'analyse historique de la technologie en milieu scolaire. Pour cet auteur, l'idée de matrice est à prendre dans le sens technique du moule, de ce qui sert à reproduire à l'identique. Elle intègre une vision épistémique mais également sociologique et donne un rôle institutionnel important aux enseignants du fait de l'orientation qu'ils impriment à leur discipline par les choix ou rejets successifs qu'ils font dans les éléments du programme officiel et par leur propre point de vue épistémique.

Une discipline scolaire peut aussi se caractériser d'un point de vue fonctionnel. Ainsi J.L. Martinand (1996) lui attribue trois fonctions scolaires en tout cas pour la fin du secondaire :

- discipline de cœur, l'axe de la filière de formation ;
- discipline de service, réponse au besoin des disciplines de cœur ;
- discipline d'ouverture,

La relation mathématiques-biologie peut alors être interrogée à la lumière de cette notion de discipline de service en termes de prescriptions curriculaires et de contenus. De quelles mathématiques la biologie enseignée aurait-elle besoin et pour quel usage ?

La mise en œuvre dans les classes dépend des prescriptions officielles mais aussi des acteurs de cette mise en œuvre, les enseignants de la discipline. Nous avons montré (Rumelhard, 1986 ; Lange, 2000-a) que les instructions officielles françaises ont, au sujet de la place accordée aux mathématiques en Sciences de la Vie et de la Terre (SVT), hésité et fluctué. Les raisons de ces fluctuations sont difficiles à cerner. Nous pouvons faire l'hypothèse d'une posture épistémologique particulière des décideurs. Des choix de mise en place contestables comme celui des statistiques descriptives et non pas inférencielles, en 1965, pour l'étude de la variabilité biologique sont probablement impliqués. La résistance des enseignants eux-mêmes doit l'être également. Ces derniers ont bien souvent vis-à-vis de leur discipline une posture épistémologique spontanée de type empirique-réaliste comme cela a été montré dans le domaine des sciences physiques (Hodson,1988 ; Robardet, 1995 ; Désautels & Laroche,1998). L'hypothèse d'une telle posture chez les enseignants de SVT ne serait en effet pas sans conséquences sur leur façon de concevoir leur discipline en particulier vis-à-vis de la relation aux mathématiques. Pour reprendre le concept de rapport au savoir développé en didactique des sciences par M. Caillot (1999) à partir des travaux de B. Charlot (1997) et ceux de Y. Chevallard (1992), le rapport aux mathématiques que les enseignants de SVT établissent ne serait pas neutre et donc pas sans conséquence vis-à-vis de l'enseignement de la discipline.

Après avoir décrits certains des éléments de l'enquête que nous avons effectuée auprès d'enseignants de SVT en formation professionnelle initiale dans plusieurs Académies en France, les résultats seront discutés à la lumière d'un état des lieux de la biologie académique et d'une réflexion épistémologique à propos de cette science.

Partie I : La posture épistémologique des enseignants de biologie

Méthodologie

L'enquête que nous avons menée a porté sur un ensemble de 56 stagiaires professeur de lycée et collège (PLC) de SVT en formation en deuxième année (PLC2) dans les instituts universitaires de formation des maîtres (IUFM) des académies de Grenoble, d'Aquitaine, Toulouse, Nantes, Rouen, durant l'année scolaire 98-99. Le choix de professeurs stagiaires correspond à la volonté de recueillir les représentations de jeunes professeurs sortant de la formation initiale universitaire. Une étape préalable a été de tester le questionnaire sur nos propres stagiaires l'année précédente.

Le choix des IUFM concernés vient de l'existence de formateurs de SVT qui, par leur implication personnelle, étaient volontaires pour le faire. Il n'était pas possible techniquement de constituer un échantillon randomisé ou représentatif de l'ensemble de la cohorte des stagiaires sur une année scolaire donnée. Cependant, le nombre de postes mis au concours du CAPES SVT, concours permettant l'accès au corps des professeurs du secondaire, en 1998 était de 380. L'effectif des stagiaires contactés représente donc environ le 6^{ème} de l'effectif de la promotion nationale.

Le public est donc captif et le questionnaire soumis au groupe de stagiaires par leur formateur de SVT, pendant son cours, avec pour seule information le fait qu'il s'agit d'une enquête à but de recherche. L'enquête débute par la consigne suivante :

« Ce questionnaire doit être complété anonymement avec le maximum de spontanéité, question par question et sans retour en arrière. Ces conditions sont nécessaires pour permettre une exploitation objective et significative des résultats. »

Un minimum de 30 minutes était nécessaire pour répondre à l'ensemble des questions. Nous sommes donc loin des conditions de félicités souhaitables dans ce type d'enquête, en particulier la neutralité entre sondeur et sondé. Cependant il s'agit davantage d'établir des constats, de déceler des tendances et non d'effectuer une enquête sociologique globale.

Le questionnaire écrit proposé comporte 26 items répartis en 5 volets.

Il comporte 22 questions fermées qui permettent une comparaison immédiate des résultats, mais qui présentent l'inconvénient d'imposer ses concepts et son vocabulaire. Pour contrer cet effet, une série de 4 questions ouvertes est proposée à la fin du questionnaire. Elle permet au sondé d'avoir l'impression d'être écouté pleinement et qu'il sera effectivement tenu compte

de ce qu'il va dire. L'analyse sémantique des réponses est effectuée par l'intermédiaire de termes clés, repérés lors de la phase de test du questionnaire, l'année précédente.

Les volets du questionnaire ont pour objectifs successifs de :

- 1) cerner le profil épistémologique du stagiaire,
- 2) évaluer l'état des connaissances concernant certaines approches « modélisantes » existant en biologie,
- 3) évaluer l'état des connaissances concernant les statistiques et le concept de corrélation,
- 4) évaluer l'état des connaissances concernant un certain nombre de termes mathématiques fréquemment utilisés dans les articles de biologie comme ceux de chaos, de fractales dans le but d'établir un score...
- 5) s'exprimer, grâce aux questions ouvertes, sur la place et le rôle attribués aux mathématiques en biologie.

Résultats de l'enquête

Seuls les résultats concernant le rôle joué par les mathématiques sont repris ici. La formulation des questions est reprise également de façon simplifiée du fait de l'importance de leur situation d'origine dans l'enquête écrite (Lange, 2000). Les items 1 et 2 sont issus réciproquement des volets 1 et 2 de l'enquête. Les items 3 et 4 sont issus du cinquième volet.

(Tableaux des réponses aux item 1,2,3,4)

Partie II : Discussion

Analyser et discuter ces résultats nous imposent deux détours préalables. Le premier nous conduit à interroger l'épistémologie de la biologie. Le deuxième prendra la forme d'un état des lieux de la mathématisation de la biologie académique et d'une réflexion sur ses fonctions.

Épistémologie de la mathématisation des sciences du vivant

Il est classique de distinguer trois catégories de sciences : les sciences de type formel, les sciences de type empirico-formel, les sciences de type heuristique.

Si le premier type correspond aux mathématiques et à la logique, les sciences de la nature (sciences physiques, chimie, sciences de la vie) appartiennent au second type. Les sciences physiques en constituent le prototype. Les travaux de Galilée sont souvent cités comme étant fondateurs des sciences modernes par le rôle central qu'il fait jouer aux mathématiques. Ils se caractérisent de la façon suivante comme le rappelle G. Rumelhard (1997, p. 29) :

- *contre Aristote, Galilée pense que les mathématiques peuvent être une clef pour la connaissance scientifique réelle de la nature,*
- *son étude abstraite des conditions de possibilité de mouvement lui permet d'énoncer des principes (ou des concepts),*
- *le travail expérimental et mathématique permet d'établir des "lois". Le mathématicien ambitionne d'informer étroitement l'expérience,*
- *le travail scientifique n'est pas seulement de fournir des explications, ou des hypothèses "purement" mathématiques. Il est de fournir des preuves de la vérité et de la réalité de ce qu'il avance.*

Cette position s'appuie sur une conception bachelardienne des sciences. Pour G. Bachelard (1934, p.141-143) le rôle que jouent les mathématiques dans les sciences modernes est fondamental :

« Il y a endosmose de la psychologie mathématique et de la psychologie expérimentale. Peu à peu, l'expérience reçoit les dialectiques de la pensée mathématique ... D'une manière générale, le simple est toujours le simplifié ; il ne saurait être pensé correctement qu'en tant qu'il apparaît comme le produit d'un processus de simplification. Si on ne veut pas faire ce renversement épistémologique, on méconnaît la direction exacte de la mathématisation de l'expérience. »

Les mathématiques, dans ce cadre épistémologique, par le détour qu'elles imposent, caractérisent la démarche expérimentale contemporaine ce qui permet de la distinguer d'une simple démarche empirique. Elles permettent une simplification volontaire et assumée de la complexité du monde sans laquelle celui-ci reste hors de portée de notre entendement. Pour G. Bachelard, la méconnaissance du rôle et de la nature des mathématiques conduit à une conception idéologique de la connaissance scientifique. Cette conception s'exprime souvent

par l'attribution à ces mathématiques d'une fonction de langage (Lecourt, 1966). Ainsi, un langage est constitué de deux composantes, le signifiant et le signifié. De cette dualité naît toute l'ambiguïté, mais aussi toute la richesse des langages. Rien de tel en mathématiques (Enock, 2000). Comme le souligne I. Stengers (1997, p. 94) : « *les êtres mathématiques n'existent que dans la mesure où ils satisfont une exigence qu'explicite leur définition : celle-ci doit résister à toutes les épreuves, se conserver dans toutes ses applications (...) le mathématicien fait exister des espaces conceptuels que nul ne peut habiter sans en accepter les contraintes.* »

C'est cette caractéristique qui justifie ce détour par l'abstraction permettant la compréhension du monde.

Mais Bachelard construit son épistémologie à partir des sciences physiques pour lesquelles les travaux de Galilée sont la référence comme le rappelle Rumelhard. Dans le domaine des sciences du vivant, l'épistémologie de G. Canguilhem est de première importance. Celui-ci évolue d'une position, que l'on pourrait qualifier de bernardienne, vis-à-vis du critère de scientificité qu'il reconnaît à l'expérimentation, position qu'il adopte plus ou moins en 1943, vers une position différente, suite aux travaux d'histoire des sciences de Fagot-Largeault (1989) et de Piquemal (1993) qu'il dirige. En effet, Claude Bernard est souvent la référence implicite des biologistes. Il est classiquement considéré comme étant hostile aux mathématiques dans les sciences du vivant, mathématiques auxquelles il oppose en critère de scientificité l'expérimentation au laboratoire. Cette position sera l'objet de polémiques et de controverses au XIX^e siècle, en particulier avec P.C.A. Louis (Lange, 2000-b). Celles-ci concernent la méthode de validation mise en œuvre dans l'établissement de la preuve et dans la recherche des causes. Claude Bernard prône l'expérimentation sur le vivant. P.C.A. Louis propose la validation statistique des relations supposées entre phénomènes et/ou le test des traitements médicaux rivaux.

Cependant, la position de Claude Bernard sur cette question n'est pas aussi fermée qu'il y paraît. Ainsi, dans son « introduction à la médecine expérimentale » (Bernard, éd.1984 p.185), il précise à propos des essais de mathématisations :

« ... les tentatives de ce genre sont prématurées dans la plupart des phénomènes de la vie, précisément parce que ces phénomènes sont complexes (...). Ce n'est point que je condamne l'application mathématique dans les phénomènes biologiques, car c'est par elle seule que, dans la suite, la science se constituera ; seulement j'ai la conviction que l'équation

générale est impossible pour le moment, l'étude qualitative des phénomènes devant nécessairement précéder leur étude quantitative. »

La position de Claude Bernard se situe dans une lignée newtonienne visant à mettre en équation la nature, même s'il en constate l'impossibilité momentanée. S'il n'attribue qu'un rôle quantitatif aux mathématiques, retenons qu'il admet comme objectif de long terme la mathématisation des sciences biologiques.

Canguilhem (1994, p. 425), pour sa part, admet progressivement que :

« ... nous avons cru pouvoir déceler dans l'effort pour « probabiliser » le jugement médical un des vrais commencements de sa scientificité ».

A ce changement de position participent les réflexions engagées lors du colloque « La mathématisation des doctrines informes » qu'il dirige en 1972. Il apparaît alors que le degré de mathématisation et la nature des relations qu'elle établit avec le domaine de connaissance en question permet de distinguer différents états dans les sciences. Il conviendrait de distinguer :

- les sciences authentiques, c'est-à-dire entièrement formalisées,
- les sciences immatures, pour lesquelles les mathématiques sont une condition de son intelligibilité, mais dont la formalisation n'est pas complètement effectuée,
- les sciences en attente de rectification, pour lesquelles la mathématisation apparente est purement analogique (Ravetz, 1972).

Mais seul le recul historique permet de statuer sur le degré d'avancement d'une science. Ainsi pour l'historien des mathématiques G. Israël (1996), il y aurait dans l'évolution récente des sciences de la nature une tendance irréversible au développement des démarches par modélisation formelle.

À côté de ces approches épistémologiques fondamentales, il existe tout une série de réflexions épistémologiques mises en œuvre par des praticiens des sciences. Chez ces derniers, la situation est très contrastée.

Si certains se positionnent en faveur d'une mathématisation du réel comme nouvelle étape historique dans le développement des sciences comme le fait le biologiste J.M. Legay (1996), d'autres attribuent aux mathématiques l'essence même du monde tel le physicien J.D. Barrow (1996).

Par contre, dans le domaine du vivant, de nombreux scientifiques se montrent nettement plus réservés. Ainsi, pour E. Mayr (1989, p. 27) :

« les physiciens tendent à ranger les biologistes sur une échelle de valeur, en fonction du degré avec lequel ceux-ci ont recours à des “lois”, des mesures, des expériences ou tout autre aspect de la recherche qu’(ils) apprécient particulièrement... Il en résulte que les jugements portés sur telle ou telle discipline biologique par certains historiens de la physique sont si grotesques qu’on ne peut guère qu’en sourire ».

Cette position est partagée par un grand nombre de biologistes évolutionnistes. Comme le précise S. J. Gould (1988, p. 14), la composante historique de la biologie évolutionniste transforme la conception même de cette science :

« L’histoire renverse cette image stéréotypée que nous avons de la science : une démarche précise, sèche, qui dépouille tout phénomène complexe de son caractère unique et le réduit à une expérience de laboratoire, contrôlée, intemporelle, et reproductible à l’envi. Les sciences historiques ne sont pas mineures, elles sont différentes. Elles sont vouées aux méthodes comparatives, qui ne sont pas toujours expérimentales. Elles expliquent, mais en général n’essaient pas de prédire. Elles reconnaissent l’ambiguïté irréductible qu’entraîne l’histoire... ».

Pour ce courant, il n’y a pas d’hostilité de principe envers la mathématisation et le recours à ces mêmes mathématiques est fréquent dans ces travaux. Mais il y a plutôt constat de l’impossibilité pour les mathématiques de permettre une conceptualisation de la biologie du fait du caractère contingent des « objets biologiques ». Cette impossibilité est alors mise en avant et particularise totalement les sciences biologiques par rapport aux sciences physiques. Il n’existe donc pas, pour le moment, dans les sciences du vivant, de consensus épistémologique. Nous ne pouvons faire ici que le constat d’une incertitude voire d’un désaccord sur ces questions.

Selon J. Guespin-Michel (1998), une façon d’analyser cette opposition serait de la relier à la nature structurelle et méthodologique bipolaire de la biologie. Cette analyse s’appuie sur les constats effectués par F. Jacob (1970). Pour ce dernier, le monde vivant est structuré par niveaux d’organisation, les « intégrons », comportant à l’une des extrémités d’une échelle de taille un pôle moléculaire, et à l’autre la biosphère. A cette vision bipolaire se superposent deux approches méthodologiques : l’approche réductionniste (analytique, « top-down ») et l’approche globaliste (synthétique, holistique, « bottom-up »). Autour de ces différences méthodologiques, se cristalliseraient alors des attitudes philosophiques composées de couples de concepts antagonistes, issus, en partie, de débats historiques : tout-partie ; continu-discontinu ; contenu-forme ; local-global ; indéfini-fini ; durée-instant ; simple-complexe ;

vitalisme-mécanisme ; matérialisme-idéalisme. Comme le précise J. Guespin-Michel (1998, p. 87) :

« ... alors que le couple réductionnisme/globalisme pouvait apparaître, dans la citation de Jacob, comme formé de deux pôles complémentaires, (...), la cristallisation des méthodologies en attitudes, et l'attraction vers ces pôles des termes opposés des couples contradictoires de la pensée, rendent ces notions contradictoires et non plus complémentaires. »

Cette pensée par couple n'est d'ailleurs pas sans rappeler le statut double de l'obstacle qui constitue la pierre de touche de l'épistémologie de Bachelard. Toujours est-il que le constat d'une certaine mathématisation du pôle écologique peut être fait contrairement aux pôles cellulaire ou moléculaire pour lesquels la méthodologie mise en œuvre équivaut de fait à une approche descriptive presque « naturaliste » des phénomènes : la molécule fait ceci puis cela...

Cette opposition serait dépassée grâce à l'utilisation de nouvelles méthodes de recherche issues des connaissances mathématiques ou physiques, méthodes désignées sous le vocable de « biologie intégrative » (Guespin-Michel & Ripoll, 2000). Dans ce cadre en effet, les mathématiques permettraient de penser la non-linéarité, les seuils, les ruptures, qui caractérisent bien souvent la complexité biologique. Les conditions d'une véritable révolution scientifique au sein des sciences du vivant seraient alors réunies.

Cette diversité des positions nous amène à regarder la situation actuelle dans le domaine de la recherche en biologie.

Importance des mathématiques dans la recherche biologique

Nous avons signalé plus haut le statut de « modèle » référent des sciences physiques pour les sciences empirico-formelles en général. La démarche cognitive mise en œuvre dans celles-ci est fondée sur un rapport dialectique entre une composante théorique formelle d'une part et une composante empirique de nature expérimentale d'autre part. Qu'en est-il réellement dans la recherche biologique ? Il est permis de constater, en première approche, que la composante théorico-formelle de la biologie est extrêmement peu développée. Cela laisse entendre qu'il existerait :

- soit une certaine spécificité de la biologie par rapport aux sciences physiques,
- soit des résistances particulières liées à ce domaine,

- soit les deux à la fois.

Toutefois, des propositions de théorisation mathématique de la biologie ont été suggérées. Ces propositions se caractérisent par la recherche de principes élémentaires tels qu'il en existe dans les sciences physiques :

- principe géométrique des formes et jeu de forces de D'Arcy Thompson (1917) ;
- principe d'ordre à partir d'ordre du physicien E. Schrödinger, (1945) ;
- principe d'ordre à partir de fluctuations du chimiste I. Prigogine, (1979) ;
- principe d'ordre à partir du bruit du biophysicien, H. Atlan, (1972) ;
- principe d'organisation fondée sur le concept d'interaction fonctionnelle actuellement développé par le bio-mathématicien G. Chauvet, (1995).

Mais les conséquences de ces tentatives restent, pour le moment, assez marginales sans que l'on puisse en préjuger le devenir.

Il existe ainsi un domaine bien établi de bio-mathématiques. La « Société Internationale de Biométrie », fondée en 1947, est toujours très active aujourd'hui. Son propos, affiché sur la page d'accueil de son site internet (www.tibs.org), est de :

« favoriser le progrès de la science biologique à travers le développement de théories quantitatives et l'application, le développement et la dissémination de techniques mathématiques et statistiques effectives. »

À côté de ces travaux tendant à établir des principes élémentaires, c'est davantage du point de vue méthodologique que l'influence des mathématiques dans les sciences du vivant se fait ressentir. Ainsi en est-il de la modélisation qui prend une place de plus en plus importante dans la recherche biologique contemporaine. Une simple recherche d'occurrence des mots clés « modèle biologique » sur la base de donnée PASCAL du CNRS nous l'a montrée aisément (Lange, 2000-a). Leur augmentation durant les années 90 est spectaculaire.

Le terme de modèle ou de modélisation recouvre des choses variées dans les publications et est largement polysémique. Parmi les nombreuses typologies qui existent, nous nous référeront à celle élaborée par C. Orange (1997). Celui-ci distingue les modèles symboliques et les modèles formels. La modélisation dont il s'agit ici est celle qualifiée de modélisation formelle. Celle-ci met en œuvre un certain nombre d'approches mathématiques que nous allons maintenant recenser.

Diversité des mathématiques mobilisées dans la modélisation

La modélisation formelle met en œuvre des ressources mathématiques qui nous conduisent à proposer la typologie suivante :

-Modèles utilisant des systèmes d'équations différentielles.

Il s'agit essentiellement des modèles à compartiments bien étudiés d'un point de vue didactique par C. Orange (1997). Ce type de modèle s'applique à tout phénomène biologique pour lequel il s'agit de suivre au cours du temps un ou plusieurs éléments se présentant successivement sous plusieurs formes, que cette forme soit une position dans l'espace, un état physique ou les deux à la fois. Le système d'équations différentielles permet alors de décrire et quantifier les transferts existants entre compartiments. Ces transferts peuvent être des transferts de matière, d'énergie, ou d'individus.

Ces systèmes d'équations permettent de modéliser des problèmes métaboliques, physiologiques, écologiques ou épidémiques. (Jolivet, 1983)

-Modèles utilisant des équations aux dérivées partielles.

Il s'agit cette fois des modèles de diffusion qui permettent de décrire l'évolution spatio-temporelle de systèmes dynamiques linéaires variés comme des diffusions de métabolites cellulaires, d'épidémies ou des problèmes de dynamique de population.

Ce type d'équation permet d'étudier en continu le phénomène biologique concerné. Mais la plupart du temps, il n'existe pas de méthode de résolution directe et simple de ce type d'équation. On utilise alors différentes méthodes qui ont en commun de rendre discrets, discontinus, l'espace, le temps, et éventuellement les états du système :

- méthode dite des transformées de Laplace qui consiste à ramener le système d'équation aux dérivées partielles à un système d'équations différentielles ;

- méthode dite des réseaux d'applications couplés, proposée par Von Neuman et Turing, pour lesquels la partie analytique est éliminée et les équations sont écrites directement sous forme discrète ;

- méthode des automates cellulaires de Von Neuman, pour laquelle la discrétisation de l'espace se fait sous la forme de petites cellules pour lesquelles l'état de chacune d'elles dépend de façon logique de l'état de la cellule voisine au pas de temps précédent.

Si les équations aux dérivées partielles permettent une approche globale et explicative d'un phénomène, les autres méthodes sont mathématiquement plus simples à manier surtout par

l'usage de l'informatique. Mais cette simplification se fait au détriment de la fonction explicative du modèle qui tend alors vers une fonction plus pragmatique de prévision.

- Modèles stochastiques.

Ceux-ci mobilisent la théorie des probabilités et les statistiques pour :

- une étude approfondie de populations dans le domaine médical, agronomique (allométrie de croissance, valeur comparée de deux traitements ou thérapies ...),
- une estimation de la valeur représentative d'échantillons (dynamique de population, biodiversité...),
- une étude de l'évolution de phénomènes aléatoires (hérédité, génétique des populations ...),
- une recherche d'imputation causale (épidémiologie, agronomie ...).

Ces modèles permettent de prendre en compte la variabilité biologique.

- Modèles utilisant des théories issues des mathématiques appliquées.

Il s'agit d'un ensemble de théories mathématiques récentes comme la théorie des catastrophes, les fractales et les structures dissipatives mobilisables dans l'étude des systèmes dynamiques non linéaires qui concernent :

- la physiologie cellulaire (réseaux métaboliques, régulation génique, cycles cellulaires, transduction de signaux...),
- la différenciation cellulaire et la morphogenèse (agrégation des amibes Dictyostélium, figures de pelage des mammifères...),
- la physiologie des organes (rythme cardiaque, ondes cérébrales, fonctionnement du système immunitaire...),
- les dynamiques de population (relations prédateurs/proies, parasites / proies ...),
- l'épidémiologie (diffusion des épidémies ...),
- l'Evolution.

Issues d'une intuition mathématique de Poincaré (1908), ces mathématiques ont été redécouvertes parallèlement par Lorenz (1963), un météorologue et par les mathématiciens Ruelle et Takens (1971) sur des problèmes de turbulences. La vision classique des phénomènes de turbulences avait été revisitée mathématiquement grâce aux travaux de Thom (1972) et Smale (1967).

Ruelle et Takens définissent alors le concept *d'attracteur étrange*. Celui-ci est un objet géométrique de dimension non-entière (les fractales de Mandelbrot (1975)) qui caractérise un système dynamique dissipatif c'est-à-dire présentant le phénomène de dépendance aux

conditions initiales. L'évolution temporelle d'un système avec dépendance sensitive des conditions initiales a été nommée *Chaos* par Li et York en 1975. Dans un phénomène chaotique, l'ordre déterministe crée donc le désordre du hasard. On parle alors de *bruit déterministe*.

Ces travaux ont conduit à un véritable changement conceptuel et l'on parle aujourd'hui de science du non linéaire. Soulignons que l'analyse de certains phénomènes biologiques qu'elle permet est davantage qualitative que quantitative (Ruelle, 1991).

Ces modèles s'appliquent particulièrement bien aux phénomènes biologiques dont ils permettent d'obtenir une description du comportement et surtout des changements de comportements, des fluctuations qui, auparavant, étaient assimilées à des phénomènes aléatoires totalement imprévisibles.

Signalons enfin qu'il existe des modélisations qui tendent vers la recherche de principes élémentaires telles que celle décrite dans les travaux de West, Brown et Enquist (1997) gommant par là même la distinction que nous avons préalablement effectuée.

Fonctions de la modélisation formelle

Qu'apportent alors ces modélisations ? Prenons l'exemple de la compréhension du cycle de l'amibe « *Dictyostélium discoïdeum* ».

L'intérêt de celle-ci est lié aux particularités de son cycle de vie qui constitue un bon modèle biologique pour les problèmes de communication inter-cellulaire et de différenciation cellulaire.

Les phases de son cycle ont été décrites par des méthodes naturalistes classiques : deux phases, l'une libre, l'autre agrégée en une sorte d'organisme pluricellulaire et ce, en fonction de l'état nutritif du milieu.

La compréhension des mécanismes sous-tendant la phase d'agrégation a été plus délicate :

- 1^{ère} étape : mise en évidence du rôle de l'adénosine mono phosphate cyclique (AMPc) comme signal intercellulaire par des techniques de biochimie classique ;
- 2^{ème} étape : description de figures en forme de cibles ou de spirales liées à des oscillations de sécrétion de l'AMPc ;
- 3^{ème} étape : compréhension de ces figures par modélisation mathématiques.

Tyson, un biologiste américain, et Murray, un mathématicien anglais ont réussi en 1988 à modéliser les oscillations de sécrétion de l'AMPc à l'aide d'un système de trois équations différentielles selon un mécanisme de réaction-diffusion. Ils obtiennent alors mathématiquement ces figures spirales.

La validation du modèle est obtenue par comparaison avec les données expérimentales qualitatives et quantitatives.

Les fonctions et rôles que peut jouer en biologie ce type de modélisation formelle sont les suivants :

- prédiction (mais prédire n'est pas expliquer comme le souligne R. Thom, (1991))
- décision
- compréhension (description, explication, conceptualisation)
- dépassement d'obstacles (discontinuité, variabilité ...)

En effet, la compréhension d'un phénomène biologique ne peut se résumer à une simple description qui peut se révéler être une étape nécessaire mais aussi, parfois, une impasse. Elle doit prendre en compte la dynamique du système. Mais cette dynamique comporte souvent des discontinuités qui sont alors de véritables obstacles que seule l'approche mathématique permet de dépasser.

Au total, la mathématisation constatée tire la biologie contemporaine vers une démarche plus théorique. Mais, dans l'état actuel des choses, elle n'en constitue pas pour autant une théorisation au sens de l'établissement de lois. De ce point de vue, la biologie conserve une spécificité par rapport aux sciences physiques.

Finalement, la nature de l'interdisciplinarité constatée n'est pas sans une certaine ambiguïté. Certains aspects de la modélisation formelle comme l'aide à la décision, la détermination de la valeur de certains paramètres qu'elle permet, tendent à induire une interdisciplinarité faible. Par contre, lorsque cette même modélisation permet l'explication voire la conceptualisation de certains phénomènes biologiques, les conditions d'une interdisciplinarité forte sont bien réunies.

Analyse des résultats de l'enquête

Au regard des éléments précédents, examinons ce que disent les jeunes enseignants stagiaires que nous avons étudiés.

Item 1 : Comme nous l'avons vu précédemment, les sciences physiques constituent souvent le prototype des sciences empirique-formelles (Rumelhard, 1997). Nous pouvons analyser les réponses à cette question à la lumière des caractéristiques qui sont attribuées à ce domaine.

Dans le contexte des sciences physiques, les théories sont construites par une interaction entre une réalité idéalisée (c'est-à-dire reconstituée avec, éventuellement, la non-prise en compte de certains paramètres considérés comme négligeables) et une théorie mathématique (Ruelle, 1991). Ce processus conduit à la formalisation de ces sciences. Cette question pose le problème, comme nous l'avons vu, de l'existence d'une biologie théorique, tout en situant cette discipline scientifique par rapport aux sciences physiques. Les résultats obtenus pourraient se comprendre comme une position défensive de la part de jeunes enseignants pour qui l'obtention du CAPES vient tout juste de valider des années d'efforts fournis en vue de maîtriser un champ disciplinaire. Mais ils peuvent également s'interpréter comme étant l'expression d'une représentation sous-jacente qui n'est pas sans rappeler la position de Claude Bernard concernant la relation mathématique et biologie (Lange, 2000-b). L'existence d'une conception bernardienne chez les enseignants de SVT a été montrée dans plusieurs recherches didactiques (Schneeberger, 1992 ; Orange, 1997). Cette conception serait l'équivalent symboliquement personnifié chez les enseignants de SVT de la posture empirique-réaliste mise en évidence chez ceux de sciences physiques.

Pour autant, nous avons évoqué également le caractère historique irréductible de la biologie liée au fait évolutif.

Sur cette question, les stagiaires PLC interrogés semblent donc se retrouver majoritairement (60%) sur une position de singularité de la biologie par rapport aux sciences physiques.

Item 2 : Cette question fait référence à l'opposition supposée entre les sciences du terrain considérées comme hostiles à toute mathématisation et les sciences de laboratoire. Cette opposition est en fait factice. Comme le souligne Y. Haila (1992), les connexions entre recueil de données et théorie sont nécessaires et multiples. Cet état de fait rencontre l'approbation d'une forte majorité (79 %) de nos sondés. L'existence d'une conception que l'on peut

qualifier de façon un peu forcée et caricaturale de « naturaliste » n'est à envisager que chez une petite minorité des sondés (7 %). Il semblerait qu'à l'issue de leur formation universitaire initiale, les enseignants stagiaires de SVT soient beaucoup plus ouverts vis-à-vis de la mathématisation de certaines sciences du terrain comme l'écologie que dans d'autres domaines. L'écologie est sûrement dans l'ensemble de la biologie le domaine qui est le plus anciennement mathématisé et nul n'ignore au sortir de l'université l'existence de modélisations mathématiques liées à la dynamique des populations comme celle de Volterra qui sera reprise plus tard par Lotka. Ce constat rejoint l'analyse effectuée par J. Guespin-Michel que nous évoquions plus haut.

Item 3 : La question des rôles attribués aux mathématiques dans les sciences du vivant est l'objet de représentations liées aux postures épistémologiques du sujet. Deux représentations sont dominantes (Rumelhard, 1997) :

les mathématiques sont un simple langage ;

les mathématiques sont un outil pour le biologiste.

Nous avons évoqué plus haut l'inexactitude de l'attribution d'une fonction de langage aux mathématiques (Lecourt, 1966 ; Enock, 2000)

La fonction d'outil constitue la deuxième représentation commune. S'il est vrai qu'une discipline peut être instrumentalisée au profit d'une autre, caractériser la fonction des mathématiques par celle d'outil est, là encore, extrêmement réducteur. Si celles-ci peuvent permettre de décrire, d'analyser, de représenter, elles permettent également de prévoir, de décider, d'expliquer c'est-à-dire de conceptualiser, de théoriser (M. Bouletreau, 2000 ; J.M. Lange, 2000-a). Signalons ici que du point de vue conceptuel, la rencontre biologie et mathématique s'est montrée riche en interactions. Soulignons l'importance des apports effectués dans le sens des mathématiques vers la biologie, dans le domaine de la génétique ou de la cladistique. Dans le sens de la biologie vers les mathématiques, il est plus surprenant de découvrir combien les statistiques sont nées d'un enrichissement mutuel et que, par exemple, les concepts de corrélation et de variance prennent leur source en biologie.

Pour revenir aux réponses données par les stagiaires à cette question ouverte, il apparaît que, si la représentation « outil » est mise en avant chez un grand nombre d'entre eux, il n'est pas fait référence à celle de « langage ». Quant à la modélisation, si elle n'est pas ignorée, elle reste faiblement citée.

Item 4 : La question de la place des mathématiques dans la biologie de recherche et la biologie enseignée a été posée en fin de questionnaire sous la forme d'une question ouverte avec l'objectif de permettre aux enquêtés de s'exprimer librement. Il est possible que les réponses se soient crispées en une sorte d'exutoire d'humeur. Cependant il apparaît rapidement deux ensembles de réponses. Le premier correspond à des réponses strictement liées à la question posée. Le deuxième ensemble est davantage l'expression d'un ressenti personnel. L'analyse sémantique des réponses a été réalisée à l'aide du repérage de mots clés, repérage effectué l'année précédente lors de la phase de mise au point du questionnaire. Ainsi, par exemple, le terme « dérangent » est-il associé à un sentiment de gêne mis en relation par les stagiaires avec un manque de connaissance ; le terme « insuffisant » quant à lui, est exprimé par des stagiaires regrettant le peu de place accordée aux mathématiques dans la biologie enseignée. Seuls 44 stagiaires se sont exprimés sur cette question.

Trois positions se dégagent :

- une position nette de rejet (trop, minime, mode, opposée au naturalisme, opposée au réel, vivant irréductible) ce que certains sondés expriment par des remarques comme « les maths sont trop théoriques. La biologie c'est l'étude du vivant ! de la vie ! ; Alors à quand la théorisation du comportement ? ». Cette position concerne huit d'entre eux, soit 18 % des sondés ;
- une position réservée, en faveur d'un statu quo, (suffisante, dérangement, satisfaisante, marginale) pour 23 stagiaires, soit 52 % ;
- une position favorable (indispensable, nécessaire, complémentaire, importante, insuffisante) pour 15 d'entre eux, soit 30 % des stagiaires.

Nous avons alors émis l'hypothèse qu'il s'agit, au-delà de réactions d'humeur, de positions nettement structurées qui correspondent à de véritables sous populations ce qu'une analyse de variance par la méthode de Snedecor (Langoulet, et Portier, 1989) nous a confirmé.

Les trois attitudes se caractérisent alors par les éléments suivants :

attitude réservée : score mathématique assez médiocre mais posture épistémologique assez ouverte.

attitude volontariste : score mathématique significativement supérieur au groupe précédent, posture épistémologique résolument moderne ;

attitude hostile : score mathématique semblable au groupe précédent mais il en diffère de façon statistiquement significative par une posture épistémologique davantage positiviste, et par la persistance en son sein d'un certain vitalisme.

Ces attitudes réparties en réservées, volontaristes et hostiles ne sont pas en soi surprenantes. Il s'agit là d'un fait relevé depuis longtemps en sociologie : les différences de discours, ou de pratiques, sont reliées à des attitudes qualifiées de positives, négatives ou neutres à l'égard de l'objet étudié. L'attitude mêle intimement éléments cognitifs et affectifs. (Moscovici, 1976).

Le questionnaire place le stagiaire dans une situation qui pourrait être l'équivalent d'une réaction face à une proposition de réforme. Celui-ci manifeste alors une réaction en lien avec un sentiment de perte d'identité. La maîtrise des savoirs scolaires ne renvoie pas seulement à la maîtrise spéculative de contenus et de paradigmes, mais plus largement à une dimension symbolique en partie constitutive de l'identité professionnelle, et donc de son identité tout court (Develay, 1995). Nous pointons ici une relation existant entre le savoir à enseigner, le rapport au savoir et l'identité professionnelle. Cette relation va dans le sens de travaux menés dans d'autres champs disciplinaires (Cogérino, 2000).

Mais il nous semble que les relations biologie et mathématiques créent un contexte particulier qui va au-delà de cela.

La pratique scientifique renvoie à des méthodes, des concepts, mais aussi à un véritable habitus professionnel (ensemble de règles, de savoirs faire, de rapport au savoir particulier) implicites qui s'acquièrent par un processus informel de type méta cognitif (Bourdieu, 2001). Dans le cas particulier du rapport aux mathématiques, Yves Gingras (2001) a montré qu'en sciences physiques, le processus de mathématisation a produit trois effets majeurs :

- un effet d'exclusion entre ceux qui maîtrisent les compétences nécessaires et ceux qui ne les maîtrisent pas, c'est-à-dire entre les professionnels et les amateurs, les insiders et les outsiders. Ce processus d'exclusion des cités savantes avait déjà été envisagé en son temps par Bachelard ;
- un effet de transformation de l'idée d'explication puisque c'est par le calcul que le physicien explique le monde, explication confrontée ensuite à l'expérimentation ;
- un effet de désubstantialisation qui affaiblit la tendance à concevoir le monde en termes de substance et non en terme relationnel.

La perte d'une vision purement expérimentale des sciences, la désubstantialisation sont des processus que nous retrouvons dans l'évolution historique des sciences de la vie que ce soit dans l'opposition Claude Bernard et P.C.A. Louis, les changements de positions de G. Canguilhem qui parlera de science de la Vie puis de science du vivant, la référence explicite à ces processus chez F. Jacob. Ainsi, le développement récent de la démarche par modélisation mathématique participe de ce mouvement.

Mais il nous semble que ces trois effets expliquent également l'attitude trouvée chez certains

professeurs stagiaires : le sentiment d'exclusion et donc de rejet, une posture bernardienne en référence à l'expérimental, jusqu'à ce formidable « mais la biologie c'est l'étude de la Vie ! », exprimé par l'un d'entre eux, dans lequel on perçoit presque de la colère.

Conséquences didactiques

Les conséquences didactiques de cet état de fait sont de deux types. D'une part, elles concernent la biologie elle-même dans la relation établie entre sa dimension académique et sa dimension scolaire. D'autre part, elles concernent la relation entre deux disciplines, dans leurs deux dimensions.

Une discipline scolaire n'est jamais une réduction ou une simplification de la discipline académique (Martinand, 1996). Cependant l'une de ses fonctions est bien d'être un élément de formation initiale dans le champ considéré. Elle doit de ce fait initier correctement aux méthodes et concepts de la discipline académique du moins pour la filière de spécialisation. Or nous avons constaté l'accroissement de la mathématisation de la biologie de recherche. Ce constat s'oppose à celui de la timidité des références à une quelconque formalisation dans la biologie enseignée dans le secondaire français. Cette discontinuité ne peut que poser problème en termes de formation scientifique. En effet, c'est au contact de cette première initiation que le futur scientifique se forge, en amont, une représentation épistémologique spontanée de sa discipline qui risque alors de faire obstacle ultérieurement à l'évolution de celle-ci.

L'autre conséquence concerne la concrétisation de l'idée de discipline de service, c'est-à-dire les conditions de la rencontre entre ces deux domaines en termes de démarche, de raisonnement, de contenus. Par exemple, les contenus mathématiques nécessaires à l'introduction de modélisations formelles dans le cursus des sciences de la vie et de la terre sont souvent d'un niveau de difficulté qui n'est pas à la portée d'un lycéen. Mais d'autres ressources le sont, en particulier les statistiques récemment introduites dans les programmes de mathématiques du secondaire français. Il est également possible d'aborder certaines approches modélisantes par le biais de logiciels de simulations informatiques. Ce travail de recensement et d'adaptation des logiciels existants est en cours (N. Salamé, ERT-é ACCES, ENS Paris - ENS Lyon/INRP).

Un autre exemple de question à laquelle il faudra répondre concerne le degré de formalisation mathématique à introduire dans l'enseignement des SVT. Et du côté de l'enseignement des mathématiques quelle place est-il possible d'accorder à ces applications ?

Si dans tous ces domaines, les recherches en didactique restent, en grande partie, à effectuer sur le mode de l'ingénierie, elles peuvent néanmoins s'appuyer sur les acquis des travaux portants sur la modélisation.

Conclusion

Il est probable qu'il y a actuellement dans les sciences du vivant une tendance à aller vers davantage de formalisation mathématique. Peut-être sommes-nous à la veille d'une véritable révolution épistémologique, selon le sens de Kuhn, mais cette question reste à discuter. Il est en effet probable que le caractère historique de la biologie dans son aspect évolutif en constitue une limite irréductible. Toujours est-il que, dans ce contexte, la formation des enseignants de biologie devient un enjeu tout à fait essentiel. Il s'agit en effet de leur permettre d'accompagner en amont ce changement ou plus précisément de ne pas générer des conditions qui s'y opposent.

Les enseignants de sciences, comme le rappellent J. Désautels et M. Larochelle (1998) ont tendance à développer une posture épistémologique qui les conduit à chosifier le savoir scientifique. Cette tendance se traduit par des stratégies d'enseignement dominées par le dire et le montrer. L'enjeu de la formation de ces enseignants est donc bien de créer les conditions d'une rupture permettant de briser le cercle vicieux de la reproduction épistémologique scolaire traditionnelle à l'égard des sciences (Désautels, 2000).

Dans le cas particulier de l'enseignant de biologie français, cette posture se traduirait par :

- une conception empirico-réaliste des sciences renforcée par l'influence marquée de Claude Bernard donnant un rôle exclusif à l'expérimental dans l'établissement de la preuve ;
- une cristallisation autour d'un rapport aux mathématiques tout à fait particulier.

Cette posture les conduirait à un habitus professionnel caractérisé, chez certains d'entre eux, par une défiance ou un rejet de toute mathématisation. Mais seule une enquête de grande

échelle portant non plus seulement sur des stagiaires en formation initiale mais également sur les enseignants en poste permettrait de quantifier cet état de fait.

L'enjeu de la formation initiale et professionnelle est bien de modifier ces deux composantes principales de leur conception des sciences. En amont, cette modification peut être effectuée par l'introduction la plus précoce possible d'une part de modélisation formelle, des occasions d'approches co-disciplinaires de problèmes biologiques, le recours à l'histoire des sciences, les bases d'une réflexion épistémologique. Des travaux, comme ceux de M. Coquidé (2000) portant sur le statut épistémologique et didactique de l'expérimental, vont dans ce sens. En aval, la formation professionnelle pourra alors se recentrer sur sa tâche essentielle qui est de permettre la transition d'un habitus de praticien des sciences vers celui d'enseignant des sciences.

Ce sont ces éléments qu'il conviendra maintenant de préciser. Mais ces différentes introductions devront être accompagnées d'une réflexion à propos des raisonnements pratiqués dans les deux domaines et du degré de formalisation possible selon le niveau scolaire. Cela nécessite également l'étude comparative des didactiques des deux champs disciplinaires. Bref, il convient de concrétiser et de tester les services que peuvent apporter les mathématiques à la biologie scolaire.

Seule, la poursuite de cet effort de recherche permettra d'inscrire cette problématique dans le champ du possible. Dans cette perspective, la didactique curriculaire développée par J. Lebeaume (1999, 2003), nous offre la méthode adaptée pour construire le curriculum souhaité.

Références

Atlan, H. (1972). *L'organisation biologique et la théorie de l'information*. Paris : Hermann.

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

Barrow, J.D. (1996). *Pourquoi le monde est-il mathématique ?* Paris : Odile Jacob.

Bernard, Cl. (1865). *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*. Paris : Baillière ; rééd. Paris : Champs/Flammarion, 1984.

Bouletreau, M. (2000). Mathématiques et biologie sont-elles en harmonie ? in *Spécial mathématiques*. Paris : C.N.R.S. info, 35-36

Bourdieu, P. (2001). *Science de la science et réflexivité*. Paris : Raisons d'agir.

- Caillot, M. (1999). *Rapport (s) au(x) savoir(s) et didactique des sciences. Actes du colloque : Milieux de pratiques et intégration des savoirs didactiques*. CIRADE, Montréal.
- Canguilhem, G. (1972). *Actes du colloque « La mathématisation des doctrines informées »*. Paris : Hermann.
- Canguilhem, G. (1994). *Études d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*, 7^e éd. Paris : Hermann.
- Charlot, B. (1997). *Du Rapport au Savoir. Éléments pour une théorie*. Paris : Anthropos.
- Chauvet, G. (1995). *La vie dans la matière. Le rôle de l'espace en biologie*. Paris : Nouvelle Bibliothèque Scientifique, Flammarion.
- Chevallard, Y. (1992). Concepts fondamentaux de la didactique : perspectives apportées par une approche anthropologique. *Recherche en Didactique des Mathématiques*, 12, 1, 73-112.
- Cogérino, G. (2000). *Rapports au savoir et identité professionnelle chez les enseignants d'éducation physique et sportive*. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches. Université Lyon 1.
- Coquidé, M. (2000). Le rapport expérimental au vivant dans la formation des enseignants. . *Tréma*, 18, 5-21.
- D'Arcy Thomson (1917). *Forme et croissance*. Paris : Seuil, 1994
- Desautels, J., Larochelle, M. (1998). About the epistemological posture of science teachers. In A. Tiberghien, L. Jossem & J. Bajoras (Eds.), *Connecting research in physics education with teacher education*. UNESCO & International Commission on Physics Education. D-3
- Desautels, J. (2000). Science teacher preparation: An attempt at breaking the re-production cycle of the traditional model of teaching. In L. P. Steffe & P. Thompson (Eds.), *Radical constructivism in action: Building on the pioneering work of Ernst von Glasersfeld* (pp. 195-212). London: The Falmer Press.
- Develay, M. (1994). *Peut-on former les enseignants ?* Paris : E.S.F.
- Develay, M. (1995) (sous la direction de). *Savoirs scolaires et didactiques des disciplines. Une encyclopédie pour aujourd'hui*. Paris : E.S.F.
- Enock, M. (2000). Les mathématiques : un langage universel pour les scientifiques ? *Spécial mathématiques*. Paris : CNRS info
- Fagot-Largeault, A. (1989). *Les causes de la mort : histoire naturelle et facteurs de risques*. Paris : Vrin.
- Gingras, Y. (2003). Mathématisation et exclusion : Socio-analyse de la formation des cités savantes. In J-J Wunenburger. *Bachelard et l'épistémologie française*. Paris : coll. Débats scientifiques, PUF, pp. 115-152.

- Gould, S. J. (1988). *Le sourire du flamant rose, réflexions sur l'histoire naturelle*. Paris : Seuil.
- Guespin-Michel, J. (1998). Réductionnisme et globalisme en biologie. *La pensée*, 316, 77-91.
- Guespin-Michel, J., Ripoll, C. (2000). La pluridisciplinarité dans les sciences de la vie : un nouvel obstacle épistémologique, la non linéarité. *ASTER*, 30, 87-104.
- Haila, Y. (1992). Mesurer la nature. In Clarke, F. et Fujimura, J. *La matérialité des sciences*. Paris : Les Empêcheurs de penser en rond, 300-326.
- Hodson, D. (1988). Toward a philosophically more valid science curriculum. *Science Education*, 72 (1) : 19-40.
- Israël, G. (1996). *La mathématisation du réel*. Paris : Seuil.
- Jacob, F. (1970). *La logique du vivant*. Paris : Gallimard.
- Jolivet, E. (1983). *Introduction aux modèles mathématiques en biologie*. Paris : Masson.
- Johsua, S. (1994). Approche critique des finalités d'un enseignement de sciences physiques. *SKOLE*, 1, 25-33.
- Kuhn, T.S. (1983). *La structure des révolutions scientifiques*. Paris : Flammarion
- Lange, J-M. (2000-a). *Mathématisation de la biologie, discipline de recherche et discipline enseignée : état des lieux et enjeux didactiques*. Thèse de didactique des sciences et techniques, ENS Cachan.
- Lange, J-M. (2000-b). Les relations biologie/mathématiques interrogent les sciences de la vie. *ASTER*, 30, 123-142.
- Langoulet, G. et Portier, J-C. (1989). *Pratiques statistiques en sciences humaines et sociales*. Paris : ESF.
- Lebeaume, J. (1999). *Perspectives curriculaires en éducation technologique*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches. ENS Cachan.
- Lebeaume, J. (2003). Construction de la technologie pour l'école moyenne en France : un aperçu historique. *La revue canadienne de l'enseignement des sciences, des mathématiques et des technologies*. 1, 83-99.
- Lecourt, D. (1966). *L'épistémologie historique de Gaston Bachelard*. Paris : Vrin.
- Legay, J-M. (1996). *L'expérience et le modèle, un discours sur la méthode*. Paris : INRA.
- Li, T. et York, J.A. (1975). Period three implies chaos. *Amer. Math. Monthly*, 82, 985-992.
- Lorenz, E.N. (1963). Deterministic nonperiodic flow. *J. Atmos. Sc.* 20, 130-141.
- Louis, P.C.A. (1835). *Recherches sur les effets de la saignée*. Paris : J.B. Baillière.
- Mandelbrot, B. (1975). *Les objets fractals*. Paris : Flammarion.
- Martinand, J-L. (1996). La didactique des sciences et de la technologie et la formation des

- enseignants. *Les cahiers du CeRF*, 4, 1-12.
- Mayr, E. (1989). *Histoire de la Biologie*. Paris : Fayard.
- Moscovici, S. (1976). *La psychanalyse, son image, son public*, Paris, P.U.F. 2^e éd.
- Orange, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : P.U.F.
- Piquemal, J. (1993). *Essais et leçon d'histoire de la médecine et de la biologie*. Paris : PUF.
- Prigogine, I. et Stengers I. (1979). *La Nouvelle Alliance, métamorphose de la science*. Paris : Gallimard.
- Poincaré, H. (1908). *Science et méthode*. Paris : Flammarion.
- Ravetz, J. R. (1972). Galilée et la mathématisation de la vitesse. Actes du colloque « *La mathématisation des doctrines informelles*, dir ; G. Canguilhem. Paris : Hermann, 11-32
- Robardet, G. (1995). *Didactique des sciences physiques et formation des maîtres : contribution à l'analyse d'un projet naissant*. Thèse de doctorat. Grenoble 1 : université Joseph Fourier.
- Ruelle, D. et Takens, F. (1971). On the nature of turbulence. *Commun. Math. Phys.* 20, 167-192 ; 23, 343-344.
- Ruelle, D. (1991). *Hasard et Chaos*. Paris : Odile Jacob.
- Rumelhard, G. (1986). *La génétique et ses représentations*. Berne : Peter Lang.
- Rumelhard, G. (1997). Travailler les obstacles pour assimiler les connaissances scientifiques. *Aster*, 24, 13-35.
- Stengers, I. (1997). *La guerre des sciences*. Paris : La Découverte/ Les Empêcheurs de penser en rond.
- Schneeberger, P. (1992). *Problèmes et difficultés de l'enseignement d'un concept transversal : le concept de régulation*. Thèse de doctorat. Paris : université Diderot.
- Schrödinger, E. (1945). *What is life ?* London : Cambridge University Press.
- Smale, S. (1967). Differentiable dynamical systems. *Bull. Amer. Math. Soc.* 73, 747-817.
- Thom, R. (1972). *Stabilité structurelle et morphogénèse*. Paris : Interéditions.
- Thom, R. (1991). *Prédire n'est pas expliquer*. Paris : Eshel.
- Tyson, J. J. ; Murray, J. D. (1989). Cyclic AMP waves during aggregation of Dictyostelium amoebae. *Development*, 106, 421-426.
- West, G.B., Brown, J.H., Enquist, B.J. (1997). A general model for the origin of allometric scaling laws in biologie. *Science*, 276 : 122-126.

Item 1

La biologie peut-elle être mathématisée maintenant ou dans le futur selon le modèle des sciences physiques ?

Oui :	24%
Non :	60%
Je ne sais pas :	16 %

Item 2

La mathématisation de la biologie de terrain est :

Une évolution regrettable :	7%
Une évolution inévitable :	14%
Participe à une clarification conceptuelle et méthodologique :	79%

Item 3

Rôles joués par les mathématiques en biologie :

outil	16 fois cité	expérimentation	3
quantification	9	démarche scientifique	3
modélisation	8	mesure	2
dénombrement	5	analyse	2
explication	4	validation	1
présentation	3	concrétisation	1

Item 4**Place des mathématiques dans la biologie de recherche et la biologie enseignée**

Ensemble 1 (réponses strictement en lien avec la question posée)

suffisante	15 fois citée	utile	2
importante	9	dérangeant	1
indispensable	6	inévitabile	1
nécessaire	5	peu importante	1
minime	3	complémentaire	1
trop	3	satisfaisante	1

Ensemble 2 (réponses à caractère plus « affectif »)

Incompatible avec le vivant	4	incompatible avec le naturalisme	1
Incompatible avec le réel	1	effet de mode	1
