

RENCONTRES ENTRE LES DISCIPLINES

Guy Rumelhard
Béatrice Desbeaux-Salviat

En proposant pour ce numéro d'*Aster* "les rencontres entre disciplines" nous avons le sentiment de reprendre un thème déjà largement débattu mais qui reste cependant au cœur de l'actualité et qui rencontre toujours de nombreuses résistances. Edgar Morin, qui organisait en 1998 un ensemble de séminaires visant à redéfinir ce que l'on doit enseigner dans le Secondaire au niveau des lycées, proposait une nouvelle fois de relier les connaissances et simultanément se plaignait du peu d'écho rencontré en France.

unifier, relier,
distinguer les
disciplines

La réflexion sur *l'enseignement scientifique et technique* oscille toujours entre deux pôles : soit elle privilégie ce qui unifie, ce qui est commun aux diverses disciplines, soit elle insiste sur ce qui les distingue, obligeant par là même à en penser les relations autrement que par simple juxtaposition. Le terme de *sciences expérimentales* peut ainsi être accepté comme facteur de *regroupement* ou, au contraire, vivement contesté car il semble *exclure* la technologie, l'astronomie et certaines parties des Sciences de la Vie et de la Terre qui ont une dimension historique et ne donnent pas lieu à expérimentation, sans parler de la santé et de l'environnement qui revêtent une dimension sociale et politique. À l'inverse il existe des mathématisations et des expérimentations abusives qui visent à donner une scientificité apparente à certains domaines de la médecine ou de la psychologie.

la collaboration
et les conflits

Au niveau de la recherche scientifique les termes de biochimie, biophysique, chimie-physique, géophysique, géomathématique, biomathématique décrivent ces "rencontres entre les disciplines" comme des avancées fécondes. Mais si la physique théorique, qui développe une modélisation mathématique, ne pose pas de problèmes, le concept de *biologie théorique* lancé à la fin des années 60 est toujours contesté par certains chercheurs. [L'article de J. Guespin-Michel et C. Ripoll aborde cette question.] Ces *croisements féconds* scellent l'apparition de disciplines nouvelles, mais aussi parfois leur disparition. Cette collaboration est réellement mise en œuvre sans bruit et sans conflits au niveau des disciplines scientifiques sous forme d'échange de techniques et de concepts, mais elle peut devenir très bruyante lorsqu'il s'agit de conquérir des places, des postes ou des crédits pour la recherche. Les arrivées de l'écologie, de la biologie moléculaire, ou d'une nouvelle géologie des plaques lithosphériques se sont faites aux dépens des sciences naturelles, par leur relégation.

La collaboration peut être complexe. Les *mathématiques* jouent ainsi de *nombreux rôles* à des moments différents de

le rôle
complexe des
mathématiques

la recherche. *Décrire* des résultats et les mettre en forme, *concevoir des plans* expérimentaux comme condition indispensable pour pouvoir observer un résultat, proposer un *concept explicatif* (équiprobabilité des gamètes par exemple), *réduire la variabilité* de l'objet vivant étudié, réduire la variabilité des mesures effectuées, *rechercher des facteurs* de variation au moyen de corrélations, prendre des *décisions d'action* concernant l'efficacité d'un médicament dont on ne connaît pas le mécanisme d'action, *confronter un résultat* statistique à une théorie, tenter de *définir objectivement* les limites du normal et du pathologique ou délimiter *les seuils de rupture*. [Quatre articles précisent diverses modalités de relation : celui de D. Malafosse et A. Lerouge pour les sciences physiques ; ceux de J.-M. Lange et de M. Arrighi qui précisent une modalité de modélisation probabiliste adaptée à certains problèmes de biologie et celui de J. Guespin-Michel et C. Ripoll qui développe une modalité de modélisation non linéaire adaptée à certains problèmes de biologie.]

Dans les *sciences humaines* le mot d'ordre de l'interdisciplinarité figure au premier plan de l'actualité universitaire depuis trente ans mais souvent, il est plus invoqué que réellement réalisé. Depuis 1975 la réflexion interdisciplinaire a été mise en œuvre en didactique des disciplines dans les travaux de l'INRP. Les équipes de Daniel Robin, puis de Jean-Louis Derouet au niveau des lycées, et celles de Louis Legrand au niveau des collèges expérimentaux ont testé des propositions variées : les 10 % du temps, les thèmes transversaux, l'éducation civique comme nouvelle discipline, l'environnement, l'éducation sexuelle. Les innovations ministérielles actuelles vont également dans ce sens : travaux d'intérêt personnel encadrés (TPE et TIPE), éducation civique, juridique et sociale (ECJS), pratique du débat à partir de thèmes, liaison entre physique-chimie et SVT en 1^e L autour de thèmes communs.

l'inter-
disciplinarité est
à l'ordre du jour
en pédagogie

D'une certaine façon, depuis vingt-cinq ans, les mots d'ordre dominants vont tous dans le même sens : les disciplines, voilà l'ennemi. Elles sont la cause de tous les maux dans les sciences humaines et dans l'enseignement. Il faut être résolument transversal, c'est-à-dire *transdisciplinaire*, c'est-à-dire privilégier les capacités, les attitudes, les méthodes qui sont supposées communes. On pourrait parler de *poly* ou de *pluridisciplinarité* ou plutôt de *juxtadisciplinarité* car les disciplines d'enseignement se juxtaposent actuellement sans beaucoup de coordination ni de collaboration. Le terme d'*interdisciplinarité* qui suppose une collaboration reste ambigu. S'agit-il de convergence de regards disciplinaires sur un même objet concret, ou sur un même problème ? Ou bien d'un objet théorique construit en commun ? [L'article de S. Tirard propose un exemple.]

Remémorons-nous la violente charge rédigée il y a trente ans par G. Gusdorf dans l'article "*interdisciplinarité*" de l'*Encyclo-*

pædia Universalis. Il y proclamait venu le temps du savoir unitaire, de la lutte contre la désintégration du savoir, il dénonçait la spécialisation comme cancérisation épistémologique, faisait la liste des obstacles à la connaissance interdisciplinaire, etc. Ajoutons à ce réquisitoire les aspects institutionnels : une discipline étant constituée, une corporation se crée et cherche à se défendre pour sauver des postes, des crédits et des heures d'enseignement. Rigidités, corporatismes, cloisonnements étanches, associations de défenses et aussi hiérarchies de valeurs sont le cortège inévitable de ce genre de situation.

lutter contre
la hiérarchie
des disciplines

Par ailleurs la hiérarchie positiviste reste d'actualité. Pour maintenir la technologie au bas de l'échelle, le concept positiviste d'*application* désigne toujours une triple relation de postériorité, d'imitation nécessairement imparfaite, de subordination et de dépendance. *Science appliquée*, voilà l'injure persistante. Le préfixe "bio" vient cependant donner quelque lustre aux "biotechnologies". [L'article de L. Simonneaux développe ce cas.] On pourrait encore examiner le statut, dans l'enseignement et la recherche, de l'informatique, des sciences dites de l'ingénieur, de l'automatisme et des mécanismes de régulation. [Astery a déjà consacré plusieurs numéros.] Les termes de *discipline outil* ou *discipline de service* risquent toujours de sous-estimer le côté créateur de ces rencontres. Dans le domaine de la didactique, qui nous intéresse ici, si les histoires des sciences et les épistémologies ne constituent pas les fondements de la didactique, elles ne sont pas pour autant de simples outils temporaires et occasionnels.

La direction inverse est rarement prise : y a-t-il un côté positif, sinon même une *condition de possibilité* au niveau de la recherche, dans l'existence d'une structuration disciplinaire ? Est-ce transposable dans l'enseignement ? En critiquant les disciplines ne sommes-nous pas en train de dire que les nombres sont l'obstacle principal à l'arithmétique ? Ou bien, inversement, n'admettons-nous pas, sans le dire, qu'il n'y aurait rien de négatif dans la *transdisciplinarité* ? Pas de syncrétisme, de confusion, de mélange dommageable des perspectives, des méthodes, de dénaturation des concepts par trop de "nomadisme" ? Le terme de discipline ne décrirait-il qu'une réalité sociologique condamnable ou bien, au contraire, une *nécessité épistémologique* temporaire dans la constitution du savoir et surtout une *nécessité principalement pour l'apprentissage du débutant*. C'est un peu le même débat que celui, rarement abordé, concernant le concept de *paradigme* : on ne sait si ce concept correspond à une nécessité épistémologique positive dans la recherche scientifique ou à une regrettable réalité sociologique, source de toutes les inerties, retards, et impasses. [L'article de B. Salviat évoque cette question.]

la séparation
des disciplines
est une
condition pour
le débutant

Pour Michel Foucault, au niveau de la recherche, le concept de discipline est un *principe de limitation*. Principe relatif et

la spécialisation
est positive

mobile. Principe qui permet de construire, mais selon un jeu étroit. C'est un *principe de contrôle* et de *contrainte* : domaine d'objets, ensemble de méthodes, corpus de propositions considérées comme vraies, jeu de règles et de définitions, de techniques et d'instruments. Tout ceci constitue une sorte de système anonyme à la disposition de celui qui veut s'en servir et qui relativise le génie personnel de l'inventeur initial et de l'utilisateur. C'est seulement en prenant en considération cette *fonction restrictive* et *contraignante* que l'on peut rendre compte du *rôle positif et multiplicateur* d'une discipline. Pour Bachelard l'idée de *spécialisation* est positive et il s'étonne que cette notion soit dénoncée comme mutilation de la pensée, dénonciation dont il retrouve déjà la manifestation chez Goethe. Seule une culture scientifique solide et très large peut déterminer la spécialisation. C'est bien souvent un perfectionnement de détail qui demande une refonte totale d'un procédé de fabrication. Par contre les idées trop générales sont des raisons d'immobilité. Et si l'on reproche aux spécialisations un émiettement, il faudrait encore développer l'idée que, au niveau des sciences, la *puissance d'intégration* et de *structuration* est intrinsèque au savoir qui se constitue.

les objectifs
éducatifs
sont trans-
disciplinaires

La didactique d'une discipline serait l'antithèse même du regard que portent les sciences de l'éducation sur l'enseignement scientifique. Si l'on enseigne une discipline c'est nécessairement pour des finalités plus lointaines ou plus générales qui dépassent le contenu factuel. Le regard éducatif et culturel est nécessairement *trans* ou *méta* ou méthodologique. Dans cet axe critique la discipline serait alors centrée, à courte vue, sur elle-même, sur un savoir factuel et purement informatif sans valeur formatrice et culturelle. Mais personne n'a jamais défendu l'enseignement du latin ou du grec ancien pour lui-même, sauf peut-être au XVIII^e siècle, quand il constituait la langue des clercs et des savants, sinon un signe de reconnaissance de l'élite. Et le terme, récent au niveau scolaire, de discipline signifie-t-il autre chose que "exercice d'entraînement" pour assimiler des règles?

Un département de didactique des disciplines (à l'INRP), une association pour la recherche en didactique des disciplines (ARDIST) ne pourraient garder droit de cité que si on admet l'existence d'une *didactique générale* comme fleuron de l'analyse de chaque discipline. En fait les disciplines scolaires sont le mélange pragmatique d'un contenu factuel et d'une gymnastique intellectuelle visant à s'exercer pour mieux comprendre et mieux produire au niveau pratique. Mais il y a derrière ce pragmatisme un débat positiviste : peut-on isoler et apprendre une méthode "en soi" indépendamment de tout contenu ? Le risque inverse étant de rester très strictement au niveau factuel par peur des "interprétations" abusives et des "jugements" hâtifs. On rencontre ici la dialectique du général et du particulier, de l'analyse et de

la synthèse, du tout et de la partie. Pour voir "loin", faut-il voir "de loin" ? Question de pouvoir séparateur, de niveau de détails, de profondeur de champ. Voir de loin rend le paysage flou et sans profondeur. L'objectif photographique "grand angle" déforme la photo. On peut aussi utiliser la métaphore de la hauteur de vue ! Ce qui est fastidieux et sans lustre c'est de faire du travail de détail précis, c'est de faire des exercices, de s'exercer. Il y a beaucoup plus de gloire à voir les choses de haut, à avoir des pensées générales.

Au niveau factuel les disciplines scolaires ne sont-elles que la réduction homothétique des disciplines universitaires, ou leur transposition, ou bien répondent-elles à d'autres *logiques sociales, utilitaires* ou *idéologiques* avec leurs exercices canoniques qui n'ont aucun équivalent dans la vie courante ou à l'université ? Quelle est la *fonction sociale* de l'enseignement scientifique ? Cet enseignement est-il (doit-il devenir) totalement autonome, fermé sur lui-même, à l'abri de toute contamination ou finalisation sociale ?

le savoir
de l'ingénieur
guide les
finalités de
l'enseignement
scientifique

Demandons-nous si la représentation du *savoir de l'ingénieur* n'est pas le véritable guide de l'enseignement scientifique, à côté d'*objectifs utilitaires* ou *moraux* tels ceux liés à l'environnement et à la santé. Les *pratiques sociales* qui servent de référence sont celles du *technicien, de l'ingénieur, du médecin* et non pas celles du chercheur. Mais tout ceci est volontairement masqué en particulier parce que tous ces acteurs se donnent étroitement la main. La pédagogie y contribue de son côté en privilégiant le fait de résoudre des problèmes essentiellement pratiques et rarement théoriques, de rester au niveau opératoire, au niveau de l'activité pratique, de faire faire des travaux pratiques, des manipulations. La philosophie pragmatique de John Dewey, tant critiquée par Hannah Arendt, est présente de manière latente et donne une cohérence peu connue à cette association depuis le début du siècle.

Il faudrait retrouver l'esprit des Lumières qui a été recouvert et volontairement masqué par le discours scientiste-spiritualiste du début du *xx^e* siècle. Les proclamations d'humanisme scientifique ou plus modestement celles de la formation d'un "esprit scientifique" ayant disparu, il reste à fixer de nouveaux objectifs culturels à la formation scientifique et à la formation technologique.

Que se cache-t-il derrière cette insistance à dénigrer les disciplines ? On peut y voir une raison trop faible : le manque de courage pour faire un travail fin, précis, rigoureux mais fastidieux ; ou une raison trop forte : la peur de porter des jugements de vérité, ce qui conduit à un certain anti-intellectualisme. On peut aussi y voir les doubles faces, les ambiguïtés d'objectifs éducatifs conflictuels portés par des idéologies politiques contradictoires.

analyser
et penser
l'intégration

En biologie, le débat entre *réductionnisme* et *globalisme* trouve ici un écho très net. [L'article de B. Salviat développe cette question.] Bel exemple d'interdisciplinarité dans la rencontre de *problèmes identiques* au niveau scientifique et pédagogique mais dont il est toujours possible de nier l'existence. Connaître c'est analyser. Analyser, c'est décomposer, séparer, isoler ; quitte ensuite à construire des concepts permettant de *penser l'intégration*, à reconstruire une totalité structurée, organisée, grâce aux concepts de régulation, de système, etc. Mais le concept de *complexité*, par exemple, sert aussi parfois à prôner un retour au globalisme compris comme fusion ou confusion de perspectives différentes, comme privilège du tout sur les parties, sinon même comme refus d'analyser ou de rechercher des causes.

Au niveau pédagogique, on peut apercevoir dans cette dernière position un *fantasme d'unité* de l'individu-enfant, une peur devant un danger d'éclatement. L'enfant est global. L'individu est indivisible, donc non analysable, non décomposable. Doit-on pour autant enseigner de manière globale, et refuser toute analyse ? Ce à quoi devrait correspondre un savoir formant lui-même un tout, si possible enseigné par une personne unique, garante de la synthèse, mais aussi, diront certains, qui ne maîtrise pas suffisamment les parties.

La confusion entre la logique affective ou sociale de l'élève-enfant et la logique du savoir conduit à la création d'un faux conflit étonnamment récurrent. Il y aurait ici confusion entre le cognitif, l'affectif, le social. Ce refus de séparation relèverait d'un *fantasme de fusion-effusion-confusion*.

Dernier angle d'analyse visant à expliquer la méfiance vis-à-vis des disciplines, la création d'une discipline, son *institutionnalisation* transforme le travail de recherche et d'enseignement en le rapprochant le plus possible d'un simple *métier*, en réduisant la part du génie créateur personnel. Nombreux sont ceux qui préféreraient la création d'une œuvre individuelle dont l'auteur est reconnu, et éventuellement médiatisé.

Il aurait été également intéressant de se demander si au niveau Collège et Lycée on doit nécessairement commencer d'emblée par des *disciplines constituées* enseignées par des *enseignants différents* ayant une *formation spécifique*. [L'article de D. Galiana décrit une expérience d'enseignement interdisciplinaire.] Le sujet est très controversé et non dénué d'arrière-plans financiers et administratifs. Inversement si l'on commence par un thème d'étude indifférencié, la première étape ne serait-elle pas de construire divers *types de regard* ayant chacun leur logique, leur cohérence, leur organisation, autrement dit *des disciplines comme exigence initiale surtout pour des débutants* ? Par la suite seulement il sera possible de tenter de tirer des fils trans-

construire
des logiques
disciplinaires
avant de
les relier

versaux. Relier des disciplines devient alors un *but final*, pas une condition de possibilité initiale, ni un moyen accompagnant l'assimilation d'un savoir. Les textes ci-après donnent quelques échantillons des débats que nous venons d'évoquer.

Guy RUMELHARD
Lycée Condorcet, Paris
Unité "Didactique des sciences
expérimentales", INRP

Béatrice DESBEAUX-SALVIAT
Lycée Louis-Le-Grand, Paris
Unité "Didactique des sciences
expérimentales", INRP

RÉDUCTIONNISMES EN BIOCHIMIE, ÉCLAIRAGE ÉPISTÉMOLOGIQUE ET DIDACTIQUE

Béatrice Desbeaux-Salviat

La biochimie nous fournit l'un des meilleurs exemples de synthèse entre différentes disciplines et entre différents niveaux d'explication où méthode analytique et modélisation se combinent de manière étroite et complexe. Historiquement, les approches réductionnistes se heurtent au vitalisme avant de vaincre les résistances, pour s'avérer certes productives mais aussi décevantes. Des créations didactiques originales, intégrant des adaptations de manipulations inventées par des biochimistes de la première moitié du XX^e siècle, font émerger chez des élèves de lycée un questionnement sur l'existence et la validité des approches réductionnistes mises en œuvre pour étudier le vivant.

Nous avons interrogé, par le biais d'interactions verbales, de débats, et de productions écrites d'élèves, l'impact de ces situations innovantes sur la confrontation et la fissuration des conceptions initiales. Elles peuvent aider à penser des phénomènes complexes et contribuer à la prise de conscience par le public scolaire, du fait que le scientifique "construit son objet d'étude", à l'abandon de l'idée qu'il explore un "donné", un domaine qui "préexiste" en "découvrant" la réalité. Elles contribuent en somme à privilégier l'aspect construit de la connaissance biochimique, ses valeurs de représentation et de distanciation par rapport au réel.

la biochimie,
une association
entre chimie
et biologie...

La chimie est-elle un outil efficace pour "réduire" le vivant ? La décomposition d'un tout en ses différentes parties suffit-elle à expliquer les propriétés d'un organe ou d'un organisme ?

Des approches réductionnistes du vivant sont fréquemment mobilisées dans l'enseignement de la biologie, mais rarement de manière explicite : on passe continuellement d'un niveau d'organisation à un autre en considérant la "molécularisation" comme une évidence. Nous envisageons d'interroger cette évidence dans le but de proposer une alternative au mode de transmission dogmatique des connaissances biochimiques, si fréquent dans les classes de lycée. La biochimie est une science dont le nom hybride suffit à évoquer une association disciplinaire entre chimie et biologie. Les références dont les enseignants biologistes de lycée classique disposent habituellement en biochimie ne leur permettent pas de mettre en œuvre une démarche prospective, ce qui les empêche parfois de gérer efficacement une séance de TP-problème. Nos observations de classes ont révélé que les élèves n'avaient pas spontanément recours à des démarches réductionnistes, lorsqu'ils étaient placés en situation d'expérimenter, et ont révélé que les obstacles à surmonter étaient multiples.

... à explorer
au lycée

Or, l'ensemble des méthodes, des démarches et leur évolution dans le domaine de construction de la science peuvent servir de référence plus ou moins explicite pour la construction des démarches et des méthodes mises en œuvre dans l'enseignement des sciences. Dans le but de mieux comprendre l'aporie fondatrice de la biochimie et la place des approches réductionnistes dans l'émergence historique de cette discipline au XX^e siècle, nous avons recherché, traduit et analysé des publications scientifiques d'importance majeure, peu connues en France. Nous avons également inventé et testé des situations pour la classe de Première S, inspirées par l'analyse et l'interprétation de ces publications.

Les résultats de cette recherche pourraient donner aux enseignants la possibilité de diversifier leurs approches en mettant effectivement la pratique expérimentale au centre de leur enseignement.

1. RÉDUCTIONNISMES : PRINCIPALES ACCEPTIONS

Le terme "réductionnisme" est polysémique; il comporte au moins trois acceptions différentes, que nous allons tenter de préciser.

1.1. Le réductionnisme théorique

Le réductionnisme théorique consiste à vouloir montrer que des théories et des lois formulées dans un domaine scientifique donné représentent des cas particuliers de théories ou de lois formulées dans d'autres domaines de la science. Quand on arrive à faire cette démonstration, on dit qu'un domaine de la science a été "réduit" à un autre. Par exemple, la biologie serait réduite à la physique, si l'on arrivait à définir tous les termes de la biologie en termes de physique, et si toutes les lois de la biologie pouvaient être déduites des lois de la physique. Des tentatives répétées de réductionnisme théorique se sont produites à l'intérieur des sciences expérimentales, mais elles n'ont jamais, selon Popper (1963), été couronnées de succès. Il ne semble pas qu'une théorie biologique particulière ait jamais pu être réduite à un système physico-chimique. Les concepts essentiels de la génétique (gène, mutation...) ou de la biochimie (enzyme, cycle...) ne sont pas des concepts chimiques et on serait bien en peine de les trouver dans un manuel de chimie.

Selon cette définition, la biologie moléculaire est réductionniste si elle peut expliquer en termes moléculaires, moyennant quelques ajustements, les observations effectuées dans les autres disciplines biologiques. Le cas est assez favorable quand il s'agit de réduire la génétique formelle à la génétique moléculaire. Cependant il est beaucoup moins aisé de

des tentatives
infructueuses
pour
subordonner
une discipline
à une autre

réduire la biologie cellulaire à la biochimie. Certes le travail des biochimistes et des généticiens se poursuit jusqu'à ce que les protéines et enzymes impliquées dans le trafic intracellulaire aient été isolées, caractérisées, clonées et séquencées. Pourtant, la compréhension des événements intracellulaires ne se fait pas directement au niveau moléculaire, mais à un niveau intermédiaire d'analyse des phénomènes, en termes de compartiments, de vésicules. L'approche moléculaire ne s'est pas substituée aux visions antérieures, elle est venue les éclairer. Il y a complémentarité entre les approches classiques et les approches moléculaires.

"La difficulté, mais également le peu d'intérêt de cette vision épistémologique du problème du réductionnisme est qu'elle a besoin, pour fonctionner, de figer la connaissance scientifique, de l'enfermer dans des cadres rigides qui ne correspondent pas à son développement anarchique." (Morange, M., 1994)

Cette vision hiérarchique entre différentes sciences tend probablement à disparaître à la faveur de nouveaux types de relations qui s'appuient sur la science telle qu'elle est et telle qu'elle progresse : moins fermée, moins centrée sur les disciplines, plus ouverte, flexible, plus apte à réagir pour s'adapter aux contingences. Ce n'est pas ce type de réductionnisme que nous envisagerons dans la suite de notre réflexion sur l'enseignement de la biochimie.

1.2. Le réductionnisme constitutif

Admettre que la composition matérielle des organismes ne diffère en rien de ce qu'on trouve dans le monde inorganique est le fondement du réductionnisme constitutif. Ce type de réductionnisme rassemble la communauté scientifique autour du même consensus. Il n'est pas l'objet de controverses. Dans ce cadre, aucun des événements et processus rencontrés dans le monde des organismes vivants n'est en conflit avec les phénomènes physico-chimiques qui concernent les atomes et les molécules. La différence entre la matière inorganique et les êtres vivants ne porte pas sur la substance dont ils sont faits, mais sur l'organisation des systèmes biologiques.

En ce sens, la biologie actuelle admet un réductionnisme ontologique : tous les biologistes sont convaincus que tous les phénomènes, aussi complexes soient-ils, observés chez les êtres vivants résultent d'interactions entre molécules. Tout ce qui se passe à un niveau "supérieur" de complexité découle des événements qui se déroulent au niveau "inférieur". Cette approche a-t-elle toujours été évidente pour les chercheurs, notamment au début du xx^e siècle ? Et qu'en est-il actuellement pour des élèves de lycée ?

le vivant
est constitué
de molécules
soumises aux lois
de la chimie

1.3. Le réductionnisme explicatif

séparer
un tout en ses
constituants
élémentaires...

Le réductionnisme explicatif consiste à affirmer qu'on ne peut comprendre un tout sans l'avoir décomposé en ses différentes parties et celles-ci à leur tour en leurs composantes, et ainsi de suite jusqu'au plus petit niveau d'intégration. En biologie, cela signifie réduire l'étude de tous les phénomènes à la molécule. *"La pratique réductionniste consiste à séparer un tout en ses constituants, avec l'espoir de trouver dans les propriétés des constituants de quoi expliquer celles du tout."* (Atlan, H., 1986)

... est une
démarche
productive...

En d'autres termes, cela reviendrait à admettre que *"la biologie moléculaire est toute la biologie"*. Il est vrai que le réductionnisme explicatif apporte parfois des solutions intéressantes : la découverte de l'ADN par Crick et Watson a éclairé la compréhension du fonctionnement des gènes. *"Pour beaucoup d'immunologistes, bien loin d'être réductrice, la molécularisation a relativisé le paradigme défensif, toujours présent, par exemple en décelant, fossilisée dans la séquence actuelle des gènes, la trace de l'interaction complexe de l'hôte et de ses parasites... La molécularisation n'a pas seulement entraîné une progression exponentielle des connaissances, elle a provoqué une intégration et des échanges accrus entre les différentes branches du savoir biologique. L'enrichissement du système immunitaire en nouveaux facteurs cellulaires et humoraux n'a donc pas eu pour conséquence la clôture du système sur lui-même, mais une intégration plus grande avec les autres systèmes physiologiques, aux confins des neurosciences et de l'endocrinologie."* (Moulin, A.-M., 1995)

... mais
décevante

À l'inverse, René Dubos (1965) a expliqué pourquoi la décomposition réductionniste est singulièrement peu productive lorsqu'on l'applique aux systèmes complexes. *"Dans la plupart des phénomènes courants de la vie, écrit-il, les parties constitutives sont si interdépendantes qu'elles perdent leur caractère, leur signification, et en fait leur existence même, lorsqu'on les sépare du tout fonctionnel auquel elles appartiennent. Pour traiter des problèmes des systèmes complexes, il est donc essentiel de rechercher des situations dans lesquelles plusieurs sous-systèmes interdépendants fonctionnent de manière intégrée."* En définitive la plus importante critique du réductionnisme explicatif trouve son fondement dans le phénomène d'émergence, qui se traduit par le fait que les systèmes ou niveaux hiérarchiques inférieurs ne fournissent généralement que des informations limitées sur les caractéristiques et les processus de haut niveau. Une analogie est peut-être plus parlante : on ne peut interpréter l'image d'un journal en ne regardant qu'une série limitée de points la constituant.

C'est ce qu'Ayala a appelé le réductionnisme méthodologique : l'approche moléculaire serait plus "efficace" que d'autres approches plus globales des systèmes vivants et par conséquent souhaitable. Dans les années 1930 à 1940, les

membres de la fondation Rockefeller incitèrent de nombreux physiciens à se pencher sur les problèmes biologiques avec des méthodes et des techniques dérivées de la physique moderne. Ils étaient convaincus que l'approche réductionniste était la plus utile pour élucider les phénomènes du monde vivant.

Les partisans du réductionnisme méthodologique sont généralement adeptes du réductionnisme ontologique. Mais la réciproque n'est pas toujours vraie. On peut penser que tout est explicable en termes de molécules sans être persuadé que la méthode réductionniste est toujours la mieux adaptée, la plus adéquate pour résoudre les problèmes de la biologie.

1.4. Réductionnisme contre anti-réductionnisme

Réductionnisme contre anti-réductionnisme, ce conflit au cœur de la culture scientifique, né au XIX^e siècle, interpelle toujours la communauté scientifique.

Dans *“La logique du vivant”*, François Jacob présentait deux grandes tendances en biologie, deux attitudes qui finissaient par s'opposer radicalement. La première pouvait être qualifiée d'intégriste ou d'évolutionniste. Pour elle, non seulement l'organisme n'est pas dissociable en ses constituants, mais il y a souvent intérêt à le regarder comme l'élément d'un système d'ordre supérieur, groupe, espèce, population, famille écologique. Cette biologie s'intéresse aux collectivités, aux comportements, aux relations que les organismes entretiennent entre eux et avec leur environnement. Le biologiste intégriste refuse de considérer que toutes les propriétés d'un être vivant, son comportement, ses performances peuvent s'expliquer par ses seules structures moléculaires. Pour lui, il est impossible que la biologie se réduise à la physique et à la chimie. Non qu'il veuille invoquer l'inconnaissable d'une force vitale, mais parce que, à tous les niveaux, l'intégration donne aux systèmes des propriétés que n'ont pas leurs éléments. *“Le tout n'est pas seulement la somme des parties.”*

Malgré l'apparente diversité des différentes branches qui la constituent, la biologie s'est probablement unifiée au cours des dernières années. Le vitalisme sous toutes ses formes a été totalement éradiqué. Désormais, biologie fonctionnaliste et biologie évolutionniste ne s'excluent pas. Beaucoup de biologistes moléculaires étudient maintenant des problèmes évolutifs, tandis que de nombreux biologistes évolutionnistes s'intéressent désormais à des problèmes moléculaires.

La biologie a les objectifs (1) suivants :

– elle cherche à organiser la connaissance de manière systématique, s'efforçant de découvrir des relations entre phénomènes et processus;

la biologie n'est pas réductible à la chimie

(1) Objectifs définis par Ayala, F. J. (1968).

la biologie a
des spécificités

- elle s'efforce de fournir des explications aux conditions dans lesquelles se produisent certains événements;
- elle propose des hypothèses explicatives qui peuvent être testées, c'est-à-dire éventuellement infirmées. Plus généralement, elle tente, comme d'autres sciences de ramener l'immense diversité des phénomènes et processus de la nature à un petit nombre de principes explicatifs.

Au XIX^e siècle, le biologiste allemand Ernst Haeckel s'insurgeait contre l'obligation de considérer toute science comme semblable à la physique ou fondée sur les mathématiques.

Désormais, la biologie s'est émancipée. Il est admis que la complexité des systèmes biologiques diffère de ce qui existe dans le monde inanimé. *“Tout système organique est si riche en rétroactions, dispositifs homéostatiques et voies potentielles multiples, que sa description complète est tout à fait impossible.”* (Mayr, E., 1982, p. 69). De plus, rien n'existe dans le monde physique qui ressemble à des programmes génétiques ayant évolué historiquement.

la biologie
prend en
compte la
complexité

Au lieu de formuler des lois, les biologistes tirent de leurs résultats particuliers des généralisations auxquelles ils donnent souvent la forme d'un ensemble de concepts. Les processus d'émergence - l'apparition de nouvelles qualités ou propriétés imprévues à des niveaux d'intégration supérieurs dans les systèmes hiérarchiques complexes - sont infiniment plus importants dans le monde vivant que dans le monde inanimé. Pour ces raisons, les différences entre sciences physiques et biologiques s'accroissent au niveau des stratégies de recherche et des modèles explicatifs.

“Un physicien confirmé qui s'informe pour la première fois des problèmes de la biologie est déconcerté par le fait qu'il n'y pas de 'phénomènes absolus' en biologie. Toute chose est liée au temps et à l'espace.” (Delbrück, M., 1949)

On ne peut résoudre certains problèmes biologiques sans disséquer les systèmes en leurs composants, mais alors, leur destruction pour les besoins de l'analyse rend très difficile la compréhension de la nature de toutes les interactions et de leurs mécanismes de contrôle. Pour comprendre les systèmes biologiques complexes, il est nécessaire de faire coopérer les approches réductionnistes et émergentes. Cela ne va pas sans poser un certain nombre de difficultés, parfois considérables, qui prennent une importance majeure dans le domaine de la biochimie.

2. RÉDUCTIONNISMES ET ÉMERGENCE HISTORIQUE DE LA BIOCHIMIE EN TANT QUE DISCIPLINE CONSTITUÉE

confrontation
entre deux
traditions de
recherche

En matière de recherche scientifique, chaque pays et chaque discipline possède ses propres traditions qui dépendent des différents domaines de connaissance. Ces traditions reposent en particulier sur un ensemble de préjugés, de conceptions et de suppositions concernant le monde de l'expérience. Ainsi, les scientifiques construisent des systèmes théoriques et méthodologiques, paradigmes fondés sur un mode de résolution des problèmes définissant implicitement la façon dont ils "voient" le monde.

Tout paradigme peut être évalué ou au moins caractérisé par trois critères, identifiables par trois questions :

– Le premier est de "nature ontologique" : Quel est le type de connaissance à acquérir ? Quelle est la "réalité" considérée comme but de la recherche ?

– Le second critère est de "nature épistémologique" : Quelles sont les caractéristiques de la relation qui lie le chercheur et la connaissance ?

– Le troisième est de "nature méthodologique" : Comment le chercheur doit-il entreprendre sa recherche ?

Une fois qu'ils se sont soumis à un paradigme par le processus de l'éducation, les scientifiques s'attacheront à résoudre les problèmes en apportant des solutions qui renforcent et amplifient ce paradigme au lieu de le remettre en question. Rendre explicites les conceptions et préjugés qui sont la base de ses connaissances ne revêt que peu d'intérêt pour le scientifique éduqué dans une tradition intellectuelle unifiée ne concernant généralement qu'un seul domaine de la recherche. Quand cette recherche se trouve à l'interface entre plusieurs traditions disciplinaires, il est fréquent que ces paradigmes soient remis en question, ne serait-ce que parce qu'un nouveau consensus est nécessaire (il s'agit de combiner différentes approches disciplinaires).

2.1. Le fonctionnement physico-chimique du vivant

En 1847, lorsque le chimiste, physicien, médecin et physiologue Helmholtz (2), qui domine l'université allemande au moment où elle devient le modèle et le centre de la science européenne, déclare que "*tous les phénomènes de la nature doivent être ramenés au mouvement de particules matérielles possédant des forces motrices invariantes, dépendant seulement de leur situation spatiale*", la plupart des physiologues

(2) Auteur de l'ouvrage "*Über die Erhaltung der Kraft*".

les conceptions
mécanistes
du XIX^e siècle

de la puissante école allemande partagent cette opinion. Pour Liebig, Ludwig, Müller, Virchow et leurs collaborateurs, le fonctionnement physico-chimique de l'organisme vivant est soumis aux mêmes lois que la matière inanimée, et doit être étudié dans les mêmes termes. Le concept mécaniste, mathématisable parce qu'il n'attribue à la matière que des propriétés spatio-temporelles, a largement diffusé en dehors de sa région d'origine. À cette époque, les scientifiques n'excluent cependant pas l'intervention d'une "force vitale" susceptible de rendre compte de la spécificité du vivant et de son développement, mais comme cette force n'intervient pas de manière causale, elle n'est pas objet de science. Le vitalisme, largement accepté par les milieux scientifiques du XIX^e siècle, constitue une conviction subjective associée à une activité scientifique objective essentiellement réductionniste. Malgré les divergences d'opinions entre les représentants des différentes disciplines scientifiques, un terrain d'entente avait pu être délimité.

2.2. La biochimie, une discipline hybride

la biochimie
débuté par
des recherches
structurales...

La biochimie a pour but d'expliquer en termes de chimie les propriétés physiologiques des êtres vivants. Les racines lointaines de la biochimie remontent bien avant le XIX^e siècle. À l'origine toutefois, la biochimie n'était pas séparée nettement de la chimie organique et la recherche en biochimie était généralement effectuée dans les instituts de chimie. Les premiers travaux de biochimie avaient peu à voir avec la biologie; ils consistaient simplement en travaux de chimie sur des composés extraits d'organismes vivants (par exemple, extraction de l'élément phosphore des urines, interprétation par Pasteur de l'isomérisation optique à partir de l'acide "racémique" (3)) ou, au mieux sur des composés ayant une importance dans les processus biologiques (glucose, acide citrique...). Il s'agissait donc au départ de recherches structurales sur des réactions de chimie générale.

Certains résultats de la recherche en biochimie ont une importance considérable pour le biologiste. *"L'un d'eux est l'élucidation, étape par étape, de certaines voies métaboliques (par exemple le cycle de l'acide citrique), ainsi que la démonstration finale que chaque étape est normalement contrôlée par un gène spécifique."* (Mayr, E., 1982, p. 127). Le travail sur les gènes n'appartient déjà plus au champ de la biochimie, mais à celui de la biologie moléculaire, issue du croisement de la biochimie et de la génétique.

Dans les programmes scolaires français, pour diverses raisons (entre autres parce que la biochimie classique n'est

(3) Les êtres vivants sont constitués, pour les molécules asymétriques, exclusivement d'un seul des deux isomères optiques possibles (oses de la série D, acides aminés de la série L).

... puis la
biochimie
s'intéresse au
métabolisme

pas une science dans laquelle des Français se soient illustrés), la biochimie est phagocytée aux dépens de la biologie moléculaire (sous-entendu "du gène"). Pourtant, on ne peut pas nier son importance dans la compréhension des "causes proximales" du vivant en tant que conséquence du "ballet" des molécules qui se détruisent et se construisent. Rappelons que, selon Ernst Mayr, les *causes proximales* concernent les fonctions de l'organisme et de ses parties, ainsi que son développement, de la morphologie fonctionnelle jusqu'à la biochimie, alors que les *causes ultimes* (évolutives ou historiques) tentent d'expliquer pourquoi un organisme est comme il est. Les causes proximales sont en relation avec le décodage du programme génétique d'un individu donné ; les causes ultimes concernent les changements du programme génétique au cours du temps et les raisons de ce changement (4).

La biochimie constitue actuellement l'une des branches fondamentales de la biologie. Autrefois limitée à la reconnaissance des espèces chimiques des organismes, la biochimie, avec la naissance de la chimie organique et l'apparition du concept de molécules, se détache de la chimie au XIX^e siècle, lors de l'avènement de la théorie cellulaire (5), pour s'interroger sur les processus de synthèse et de transformation des constituants des êtres vivants, autrement dit sur leur métabolisme. Elle s'occupe d'approcher la connaissance des structures ultramicroscopiques des cellules, en rapport avec leur rôle dans le déroulement et la régulation du métabolisme.

Les premières décennies du XX^e siècle ont été marquées, dans le domaine biochimique, par un développement remarquable des études relatives au métabolisme intermédiaire. Nous avons recherché quel était l'état d'avancement de cette discipline en 1913, alors qu'elle commençait tout juste à être autonome. Nous pouvons ainsi mesurer et mieux comprendre la distance qui nous sépare de l'époque actuelle, où la pratique de dosages (appliqués aux tests immunologiques, aux analyses de sang), l'utilisation de médicaments efficaces issus de recherches biochimiques font partie de la vie quotidienne. "Loin de perdre leur intérêt, ces études se prolongeront certainement encore longtemps par la mise en jeu des méthodes expérimentales 'à même l'organisme' préconisées par Claude Bernard." (Florkin, M., 1984)

-
- (4) Ernst Mayr (1982, p. 76), distingue les sciences physiologiques au sens large qui étudient les *causes proximales* des phénomènes biologiques, de l'histoire naturelle qui s'occupe des *causes ultimes* des phénomènes biologiques, liées à l'évolution des espèces.
- (5) En 1839, T. Schwann définit le concept de cellule, et introduit en biologie la théorie moléculaire, car il considère les cellules comme des assemblages de molécules. Schwann remplace les diverses "forces vitales" des organes par la seule intervention des lois de la physique et de la chimie.

2.3. Les paradigmes fondateurs de la biochimie

En 1914, l'Université de Cambridge, en Grande-Bretagne, fonde une chaire de biochimie. Sir Frederick Gowland Hopkins (1861-1947) en est le premier titulaire.

au début
du xx^e siècle,
de statique,
la biochimie
devient
dynamique

Afin de mieux connaître les conditions d'émergence de la biochimie, nous avons traduit et analysé une conférence programmatique de Hopkins (6) prononcée et écrite en 1913. Elle est enrichissante à deux points de vue : en effet, elle ouvre sur l'avenir de la biochimie après cette époque, en même temps qu'elle consigne le passé. Elle permet de comprendre dans quelle logique s'insèrent les travaux des biochimistes de la première moitié du xx^e siècle : on passe d'une biochimie statique à une biochimie dynamique. En outre, elle est rédigée par un scientifique qui a joué un grand rôle dans la vie personnelle de nombreux biochimistes, en particulier dans celle de Hans Adolf Krebs, inventeur du cycle de l'acide citrique (7). À cette époque, la biochimie devait éviter un double écueil : d'une part se contenter d'une vision réductionniste des phénomènes, d'autre part se laisser submerger par le spectre encore présent du vitalisme. Hopkins fait prendre conscience des lacunes, de l'inexploré et suggère des pistes pour de futures recherches (8).

L'analyse de ce texte apporte un éclairage sur les choix à effectuer dans un cadre didactique.

Des données précises situent le cadre des travaux des biochimistes :

- la chimie structurale simple suffit à rendre compte de la composition et du fonctionnement du vivant ; la matière vivante ne peut plus être considérée comme constituée d'une molécule géante ou "biogène" très labile ;
- les enzymes sont responsables de la totalité des réactions chimiques se produisant dans la cellule vivante ;
- la cellule vivante est un système différencié ou coexistent des phases de constitutions différentes et la vie est l'expression d'un équilibre particulier ;
- pour identifier les produits intermédiaires du métabolisme, il serait erroné de continuer à s'intéresser aux produits qui s'accumulent dans les tissus ;

Hopkins,
en 1913, en fait
un éclairage
précis et
prospectif

-
- (6) Ce scientifique a obtenu le prix Nobel de médecine (avec Eijkman) en 1929 pour ses travaux sur les vitamines stimulant la croissance.
- (7) Il sauve la vie de Krebs, juif allemand, en lui offrant la possibilité de fuir l'oppression nazie en 1933. Entre 1933 et 1935, il accueille six réfugiés d'Europe centrale dans son laboratoire de Cambridge. La forte conscience sociale de Hopkins, qui lui coûta des sacrifices personnels importants, mérite d'être soulignée.
- (8) Le texte original de l'article de F.G. Hopkins et la traduction que nous en proposons sont publiés dans la thèse de doctorat de Béatrice Desbeaux-Salviat (1997). Un résumé de cette conférence respectant l'ordre chronologique d'exposition des idées figure en annexe de cet article.

– parmi les produits administrés, seuls ceux qui seront pleinement métabolisés pourront être considérés comme des intermédiaires du métabolisme.

La biologie est maintenant si vaste et si diversifiée qu'elle ne peut plus être dominée par un seul type de démarche. Pourtant, celle qui constitue le moteur essentiel de l'enseignement de la biologie au lycée est une démarche expérimentale. Les caractéristiques de ce type de démarche ont déjà fait l'objet de nombreuses recherches en didactique. Nous nous sommes plus particulièrement intéressée à la prise en compte d'approches réductionnistes explicites et argumentées dans la mise en œuvre de séquences d'enseignement avec des élèves de 15 à 18 ans.

3. RÉDUCTIONNISMES ET DIDACTIQUE DES SCIENCES : LE CAS DE LA BIOCHIMIE AU LYCÉE

Nous venons de voir que l'objet fondamental de la biochimie était de décrire, de comprendre, de rendre compte des implications physiologiques et pharmacologiques des réactions chimiques du vivant, c'est-à-dire du métabolisme. Il est important de faire comprendre aux élèves comment l'être vivant s'organise et prospère à partir d'un environnement pourtant radicalement différent de lui, mais avec lequel il réalise des échanges permanents. La troisième partie de cet article aborde la scolarisation de démarches et de concepts biochimiques. À partir de questionnaires d'élèves et d'observations de classe, des obstacles sont repérés et analysés.

penser
la scolarisation
des démarches
et concepts
biochimiques

3.1. Identification des obstacles rencontrés par les élèves

Articuler différents registres (expérience, modélisation, conceptualisation) dans une séquence d'apprentissage, nécessite de jouer la transparence vis-à-vis des élèves en mettant clairement en évidence les éléments de rupture et les relations dialectiques entre le donné phénoménologique et la conséquence de l'analyse scientifique de ce donné. Montrer l'écart entre le référent empirique et la théorie plutôt que de tenter à tout prix de le masquer relève d'une volonté de rester fidèle aux valeurs que l'on souhaite transmettre à travers l'enseignement scientifique et qui s'opposent aux idéologies, aux dogmes.

Dans le but d'évaluer leurs connaissances en biochimie et pour repérer des obstacles, nous avons proposé un questionnaire à choix multiples à 148 lycéens ayant suivi un enseignement dépourvu de pratique expérimentale. L'analyse des résultats révèle que, derrière les mots savants qu'ils retiennent, les élèves n'ont pas intégré le savoir que les professeurs étaient censés leur faire passer. Les connaissances se

l'analyse
d'un QCM
proposé
à 148 élèves
montre...

bornent souvent au champ lexical, mais rares sont les adolescents qui accèdent au contenu sémantique. Nous donnons ci-dessous un extrait du questionnaire.

Tableau 1. Questionnaire à choix multiples distribué aux élèves de lycée

Cochez les affirmations correctes

1. On nomme métabolisme :

- l'ensemble des réactions chimiques qui se déroulent au sein des êtres vivants
- l'ensemble des réactions physiologiques d'un individu
- la dégradation des nutriments dans le tube digestif
- le dégagement de CO_2 et l'absorption d' O_2 dans les poumons
- la croissance et le développement d'un organisme

2. Le CO_2 dégagé par la respiration provient :

- de l'oxydation des atomes de carbone contenus dans les nutriments minéraux
- de l'oxydation des atomes de carbone contenus dans les nutriments organiques
- d'un ensemble de décarboxylations de substances dans les mitochondries
- de réactions hyaloplasmiques anaérobies de glycolyse
- de l'oxydation de diverses substances dans l'épithélium pulmonaire

3. L' O_2 absorbé par les poumons

- est distribué à l'ensemble des cellules de l'organisme
- permet uniquement l'oxydation des substances organiques dans les poumons
- constitue le dernier accepteur d'électrons et de protons dans la chaîne respiratoire mitochondriale
- réagit directement avec le carbone des substances organiques pour former le CO_2

4. On nomme oxydation d'une substance A :

- l'ensemble des réactions chimiques où interviennent l'atome d'oxygène et la substance A
- des réactions chimiques au cours desquelles la substance A gagne des protons
- des réactions chimiques au cours desquelles A perd des protons
- des réactions chimiques au cours desquelles A perd des électrons
- des réactions chimiques au cours desquelles A gagne des électrons

5. Les réactions chimiques dans l'organisme :

- sont toujours des réactions d'oxydation
- sont presque toujours catalysées par des enzymes
- sont toujours réversibles, c'est-à-dire qu'elles coexistent avec la réaction inverse
- consomment toujours de l'énergie fournie par l'ATP
- ont pour chacune d'entre elles une localisation cellulaire précise

Les circulaires ministérielles mettent l'accent sur la nécessité d'appréhender la démarche scientifique, de développer la curiosité, d'apprendre à apprendre aux élèves plutôt que de leur faire accumuler des savoirs et des définitions. Que faire pour que les élèves participent davantage à leurs apprentissages ? Faire comprendre le fonctionnement scientifique, ses exigences et ses limites est probablement un des rôles de l'enseignement scientifique. La compréhension de ce méca-

nisme dialectique de va-et-vient entre modélisation (ou théorisation) et confrontation expérimentale devrait constituer un axe fort de cette culture scientifique minimale.

Les connaissances en chimie sont sources d'obstacles et entravent la compréhension du concept de voie métabolique. L'analyse des questionnaires a révélé que les élèves se bornaient à citer des noms, des étiquettes qui ne signifiaient rien d'opérationnel pour eux : par exemple, 21 % des élèves font intervenir à tort le cycle de Krebs dans la glycolyse, 6 % dans la photosynthèse. L'obstacle verbal décrit par Bachelard (1938) est partout présent. En Terminale, 16 % des élèves interrogés pensent que le dioxygène absorbé par les poumons réagit directement avec les atomes de carbone des substances organiques pour former le dioxyde de carbone, alors qu'il provient d'une décarboxylation catalysée par une décarboxylase. Cette erreur est probablement liée à l'interprétation de l'équation-bilan de la respiration assimilée à une combustion. Les élèves reproduisent la pensée la plus simple, proche de la pensée de Lavoisier. Cette représentation des

...qu'au lycée,
les connaissances
de chimie
s'érigent parfois
en obstacles

Tableau 2. Mise en relation entre les objectifs du programme et les difficultés repérées

| Objectifs annoncés dans les programmes de lycée (connaissances à acquérir) | Difficultés, obstacles rencontrés par les élèves | Pistes de remédiation |
|---|---|--|
| réactions biochimiques déshydrogénation décarboxylation oxydoréduction | non maîtrise du concept de réaction chimique élémentaire, alors qu'il s'agit d'appréhender un ensemble de réactions chimiques coordonnées (caractéristique du vivant) | expliciter les points communs et les différences entre approche chimique et approche biologique travailler le concept de vivant |
| conversion énergétique | absence de rattachement à des pratiques de référence absence de référent empirique absence de représentations mentales disponibles confusion entre modèle et réalité | travailler la modélisation, l'articulation entre référent empirique et théorie |

phénomènes biochimiques soulève un problème de la biologie énoncé par Hopkins en 1913 : ce n'est pas la réaction la plus évidente sur le plan de la chimie qui correspond aux processus effectivement observés dans les systèmes vivants. L'enseignement reçu par les élèves consistait en une sensibilisation exclusivement théorique aux concepts de la biochimie métabolique. Cette constatation nous a incitée à construire des activités pratiques pouvant interagir avec les obstacles identifiés.

3.2 Mise en place d'une situation-problème et résultats obtenus en classe

Johsua et Dupin (1989) ont constaté que l'influence dogmatisante du professeur était moindre dans les classes où existent entre les élèves des débats réels portant sur la validité des explications scientifiques.

Dans cette perspective nous pensions que des expériences intégrant des protocoles expérimentaux de biochimistes des années 1930 fourniraient l'occasion de développer l'utilisation des modèles et d'en montrer les limites, de les sophistiquer en fonction des besoins, mais aussi de comprendre qu'une découverte scientifique naît dans un contexte donné (9). Par exemple, le cycle de Krebs (10), essentiellement présenté dans les manuels sous une forme dogmatique, serait appréhendé d'une autre façon si on intégrait des activités visant explicitement à favoriser chez les élèves une réflexion sur leur propre savoir et ses modes de production. Les élèves pourraient ainsi acquérir un sentiment de sécurité ou un confort intellectuel, non plus fondé sur la conservation d'un connu immuable et statique mais sur l'aptitude à traiter de façon dynamique des informations nouvelles et à remanier leurs représentations.

Le but recherché ici n'était pas d'enseigner la version achevée d'une voie métabolique, mais de provoquer un questionnement des élèves sur le vivant et les démarches réductionnistes. Notre choix didactique visait à enrichir le référent empirique pour faire prendre conscience des liens, mais aussi du décalage entre l'objet scientifique construit et la réalité expérimentale.

la transposition
d'expériences
historiques
relance le
questionnement
des élèves...

-
- (9) Le détail des situations expérimentales proposées est relaté dans : Desbeaux-Salviat, B., Salviat, N., Coquidé, M. (1997).
- (10) Le cycle de Krebs a pour rôle essentiel, mais non exclusif, l'oxydation d'une substance provenant de la dégradation des lipides et des glucides, l'acétyl-coenzyme A. Il est considéré comme le carrefour des voies métaboliques. Le dioxyde de carbone que nous rejetons quand nous respirons, provient de réactions chimiques du cycle de Krebs.

Cette recherche permettait de renouveler le champ des investigations expérimentales en Première S à propos de *“Quelques aspects du métabolisme énergétique”*. Les données historiques ont servi à élaborer une construction didactique utilisant l'expérimentation assistée par ordinateur.

... favorisant
des activités
pratiques
avec des outils
variés...

Les élèves se sont d'abord familiarisés avec les outils : mesure de l'activité respiratoire avec un oxymètre relié à une interface d'acquisition de données numériques, elle-même reliée à un ordinateur (dispositif ExAO). Les expériences ont été préalablement effectuées avec des levures et des algues. On se propose d'étudier si un muscle respire. La situation exige d'argumenter et de développer les conceptions des élèves sur la notion de vivant.

Une expérience adaptée des protocoles mis en œuvre par Krebs en 1937 est proposée aux élèves de Première S. Cette expérience aide à résoudre des problèmes en relation avec des pratiques sociales de référence : la greffe d'organes, l'effet de certains poisons, l'utilisation des aliments par les tissus vivants (les cellules dégradent-elles n'importe quelle substance organique pour se procurer de l'énergie ?)... Elle vise aussi à aider les élèves à “naviguer” entre les différents niveaux d'organisation du vivant.

Les contraintes de la faisabilité en classe conditionnent le choix du matériel requis pour expérimenter ainsi que les modalités d'expérimentation. Nous avons utilisé de la viande de volaille broyée, facile à trouver en boucherie. Les plans expérimentaux devaient permettre la réalisation d'un grand nombre de manipulations identiques permettant une analyse statistique, un traitement des écarts entre les résultats obtenus dans des conditions apparemment identiques ou des écarts par rapport au modèle théorique attendu.

... sur des
objets
biologiques
réels...

Il ne s'agissait pas d'élucider la totalité des phénomènes chimiques mis en jeu : on se contentait d'analyser les entrées et les sorties, en acceptant des boîtes noires. Une comparaison à des témoins fut instituée de manière spécifique. Des comparaisons au fonctionnement d'autres niveaux d'organisation de l'être vivant (fractions acellulaires, cellules, organe, organisme) furent mises en place. Il s'agissait de rendre visible l'invisible par des marqueurs, des amplificateurs, de tenter de rétablir l'état initial après modification (réversibilité expérimentale), d'avoir la possibilité d'imposer des modifications internes ou externes.

Ces séances avec les élèves nous ont donné l'occasion de travailler explicitement le concept de modèle biochimique. Dans ce cadre-là, le modèle est une construction de l'esprit correspondant à une certaine idée que l'on se fait du réel à étudier, dont il donne une explication partielle et provisoire. Il permet aussi de faire des prévisions. Dans les modèles physiques étudiés au lycée, on imagine généralement un certain nombre de paramètres supposés indépendants les uns des autres. On en fait varier un seul et on maintient fixes

ou constants les autres, en supposant implicitement qu'on les a tous désignés. Mais, en biologie, on n'est jamais certain d'avoir désigné tous les facteurs agissant (c'est l'un des sens du témoin). De plus, la plupart des facteurs sont interdépendants, organisés en chaîne, en réseau, en système.

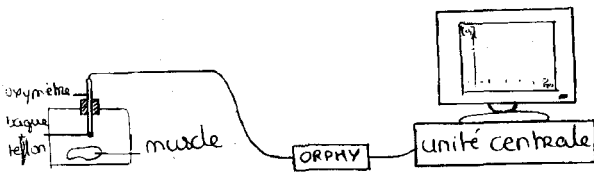
Les élèves étaient invités à proposer des protocoles expérimentaux permettant de tester si les muscles consommaient ou non du dioxygène. Spontanément, aucun élève n'a pensé à broyer le muscle pour augmenter la surface d'échanges avec le milieu.

Document 1. Production d'élève n'ayant pas encore pris connaissance des protocoles expérimentaux de biochimiste

Protocole permettant de tester si un muscle est vivant ou non

Hypothèse : un muscle respirerait c'est-à-dire qu'il absorbe du O_2 & rejète du CO_2

Expérience :





Après avoir étalonné la sonde à oxygène, on la place dans un bocal étanche contenant 1 muscle préalablement extrait d'un organisme quelconque. Cette sonde reliée à l'ORPHY puis à l'ordinateur permet de mesurer la concentration d' O_2 dans le bocal. Si la concentration d' O_2 reste stable alors le muscle ne rejète ^(courbe stable) pas d' O_2 & ne respire pas. Mais si la courbe de O_2 diminue alors le muscle a absorbé l' O_2 présent ds le ^(concentration d') bocal.

Remarque : On pourrait faire d'autre expérience permettant de voir si 1 muscle qui absorbe du O_2 , rejèterait du CO_2 comme chez la respiration des êtres vivants. Pour cela, on place un bout de muscle dans une boîte étanche remplie d'eau de chaux. Si celle-ci se trouble, alors le muscle rejète du CO_2 . Si elle ne se trouble pas alors le muscle ne respire pas.

Document 2. Production d'élève ayant pris connaissance
des protocoles expérimentaux de biochimistes

Le muscle serait vivant
Le muscle respirerait

MT:  eau
bouillie
dans broyat

ME:  broyat de
muscle

Si la concentration en O_2 diminue, c'est que le muscle respire.
Si la concentration en O_2 stagne, c'est que le muscle ne respire pas.

On constate ~~pas~~ sur le graphique que la concentration en O_2 diminue. Après 5 minutes on ajoute du citrate et on observe une chute plus importante de la concentration en O_2 car le citrate est un élément qui va apporter de l'énergie au muscle. Dans les 5 dernières minutes de l'expérience on ajoute du malonate, la concentration en O_2 stagne et augmente un peu car le malonate est un poison qui bloque la respiration. Dans le montage témoin, la concentration ne bouge pas, elle stagne. Donc le muscle respire lorsqu'il est vivant.

Le document 1, montre une production d'élève dans laquelle le muscle est appréhendé comme une entité, un bloc compact, qu'on pouvait à la rigueur couper en gros morceaux, mais en aucun cas, réduire en bouillie.

La lecture d'un protocole expérimental adapté d'un biochimiste (Krebs, 1937) a servi de déclencheur pour que les élèves envisagent d'effectuer un broyat du muscle (document 2). Toutefois certains élèves refusent obstinément de passer le muscle au hachoir, considérant cet acte comme une atteinte à l'intégrité du vivant.

... et une réflexion sur les liens entre l'objet scientifique construit et la réalité expérimentale

Cette approche réductionniste, que les scientifiques ne songent plus depuis longtemps à interroger, tant elle est intégrée dans le paradigme métaphysique du champ de recherche auquel ils appartiennent, n'a donc rien d'évident pour les élèves de lycée. Elle s'érige au contraire en obstacle majeur, en paradoxe insurmontable : comment envisager d'étudier les propriétés du vivant sur quelque chose de mort, saccagé et informe ?

Nous avons pointé *“le caractère d'obstacle présenté par l'expérience soi-disant concrète et réelle, soi-disant naturelle et immédiate”* (Bachelard, G., 1938), et nous avons tenté de démythifier la conviction empiriste naïve véhiculée par de nombreux enseignements qui consiste à faire comme si le savoir des élèves pouvait immédiatement découler d'une observation.

3.3. Réflexion critique sur le vivant et le réductionnisme constitutif

Les élèves ont appris à raisonner sur le vivant en enlevant la vie. Les activités menées en classe ont montré qu'il fallait sortir du vivant pour pouvoir l'analyser puis y revenir, dépasser le côté affectif. Les élèves adhèrent volontiers à la théorie holiste selon laquelle les phénomènes du vivant sont des totalités irréductibles à la somme ou à l'association structurelle de leurs composantes. Des entretiens révèlent que les dérives vers des conceptions vitalistes ne sont pas totalement éradiquées.

les élèves ne mobilisent pas spontanément des approches réductionnistes

A-t-on tort de vouloir distinguer le vivant du non-vivant ? Est-ce que l'expression *“matière vivante”* ne renforce pas l'idée d'une différence fondamentale entre matière constitutive des êtres vivants et matière constitutive d'objets n'ayant jamais été vivants ? Dans un mouvement dialectique, lorsqu'on travaille à lever un obstacle (ici l'obstacle vitaliste) on est souvent confronté à d'autres obstacles.

Sur un plan relationnel, l'intérêt de telles pratiques de classe est évident dans la mesure où l'enseignant fait plus attention à ce que disent les élèves, explicitant leur questionnement sans réagir à leurs erreurs. De plus, les élèves acceptent de considérer la phase d'apprentissage comme une succession de rectifications d'erreurs et non pas comme une simple accumulation de connaissances artificiellement plaquées. Un questionnaire a permis de recueillir les impressions des élèves concernant le travail qu'ils avaient eu à effectuer lors des séances précédemment décrites. Afin qu'ils bénéficient d'une certaine liberté d'expression, nous leur avons posé des questions ouvertes. Les réponses étaient anonymes et sous forme écrite. Les résultats décrits ci-dessous concernent 118 élèves et sont exprimés en pourcentages arrondis à l'unité la plus proche.

“Ce TP m'a aidé à apercevoir le décalage entre les expériences et la théorie.”

les avis
des élèves sur
ces pratiques
de classes
sont mitigés

“Parfois on se demande comment les chercheurs ont fait pour trouver certaines choses. Lorsque nous refaisons ces expériences, ça aide d’une part à mieux comprendre le cours et de quoi on est partis pour arriver à une conclusion.”

“L’expérimentation m’a permis de mieux comprendre la théorie. Ainsi, on a pu émettre des hypothèses comme les chercheurs avaient fait il y a des années.”

Il apparaît que 28 % des élèves n’ont vu aucun lien entre ces expériences et le cours sur le métabolisme, et n’ont pas compris la finalité de ce travail. Les autres pensent avoir pris conscience d’un lien entre expériences et théorie, mais de deux manières opposées : soit en exprimant le décalage entre les deux (38 %), soit en insistant sur leurs relations de concordance (34 %). Les premiers sont frappés par la différence qui existe entre la théorie et le référent empirique, les autres voient en ce référent une passerelle permettant de remonter à la théorie.

3.4. Mise en scène didactique du savoir biochimique et réductionnisme explicatif

Une meilleure compréhension des modes de construction du savoir scientifique ne se limite pas à un débat théorique. Elle a un retentissement éminemment pratique, dans la mesure où l’idée que les enseignants se font de la science peut affecter leurs stratégies d’enseignement et à terme influencer l’appropriation de concepts scientifiques par les élèves.

L’objet de savoir est soumis à une dichotomie : il existe une version pour l’enseignant (qui accède aux données historiques, aux publications originales des scientifiques) et une version pour l’élève. L’exemple présenté ici nous a montré que la coexistence et l’articulation de ces deux versions conditionnent l’apprentissage didactique du savoir. Contrairement au mathématicien, le biologiste ne peut pas se contenter de transposer le texte du savoir. Contrairement au chimiste, il ne peut pas réduire grandement l’objet de son étude au risque de quitter le champ de sa discipline : étudier une seule réaction chimique d’une voie métabolique ne permet pas de saisir son intérêt biologique.

La mise en place des activités proposées et l’évaluation de leur impact, nécessaire en recherche, prennent beaucoup de temps. Il faudrait privilégier en classe davantage de situations qui permettent à l’élève de faire des allers et retours entre des événements macroscopiques et une représentation mentale de ces mêmes événements à l’échelle microscopique : une difficile, mais prometteuse gageure ! Si enseigner consiste à mettre en scène un savoir, nous sommes loin d’avoir épuisé toutes les possibilités qui permettent d’y parvenir, mais nous avons seulement suggéré quelques-unes d’entre elles. Développer ce genre de recherches sur un nombre plus étendu de savoirs pourrait servir à construire des séquences de classe moins dogmatiques, plus proches de

le concept
de transposition
didactique
fonctionne mal
en biologie

ce qu'est un savoir en mouvement, construit dans le cadre épistémologique d'un réductionnisme constitutif et d'un réductionnisme explicatif maîtrisés.

CONCLUSION

la didactique de la biochimie fait évoluer les approches réductionnistes du vivant dans l'enseignement...

On reproche souvent à l'enseignement de la biologie de coller systématiquement aux derniers développements de la "science qui se fait", sans le recul nécessaire permettant d'écarter les caprices de la mode. Or actuellement, bien qu'on n'ait pas encore identifié toutes les voies métaboliques, on peut affirmer qu'il n'y aura pas de révolution dans la discipline. En raison de cette stabilité disciplinaire, l'enseignement de la biochimie méritait bien qu'on lui consacre une recherche didactique.

La biochimie fournit un exemple intéressant de synthèse entre la chimie et la biologie où se combinent plusieurs traditions de recherche. Des créations didactiques intégrant des adaptations de manipulations effectuées par des biochimistes de la première moitié du XX^e siècle ont fait émerger chez les élèves, au lycée, un questionnement sur la validité des approches utilisées pour étudier le vivant et nous ont montré que les élèves ne mobilisaient pas spontanément un raisonnement réductionniste.

... en proposant des situations pour questionner et manipuler...

Les situations que nous avons testées en classe peuvent aider les élèves à penser des phénomènes complexes. De plus, elles constituent un "terreau", un "socle" pour favoriser à travers les interactions verbales entre élèves, élevées au rang de débats, la confrontation et la fissuration des conceptions initiales. Ce n'est que plus tard que les élèves arriveront à déterminer le détail des composants physico-chimiques intervenant dans les processus physiologiques. Il ne s'agit pas, pour l'enseignant, de vouloir éradiquer les obstacles de la pensée des élèves. Au contraire, en partant des questions qu'ils posent, il devient possible de repérer les obstacles, de les situer les uns par rapport aux autres, puis de construire des activités pouvant interagir avec les obstacles. Le passage d'un niveau d'organisation à un autre (organe, cellule, molécule), et donc le recours à des notions de chimie perdent de leur caractère mystérieux et confus.

... afin de mieux comprendre le passage d'un niveau d'organisation à un autre

L'un des objectifs essentiels que visait cette expérimentation didactique était aussi de permettre aux élèves d'ajouter un critère à leur représentation du vivant : "l'existence d'un métabolisme".

Béatrice DESBEAUX-SALVIAT
Lycée Louis-Le-Grand, Paris
Unité "Didactique des sciences
expérimentales", INRP

BIBLIOGRAPHIE

- AYALA, F. J. (1968). Biology as an autonomous science. *Amer. Sci.* 56, 207-221.
- AYALA, F. J. (1989). Thermodynamics, Information and Evolution : the Problem of Reductionism. *Hist. Phil. Life Sci.*, 11, 115-120.
- ATLAN, H. (1986). *À tort et à raison. Intercritique de la science et du mythe*. Paris : Le Seuil.
- BACHELARD, G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- BEAUFILS, D., LARCHER, C. (1999). *Aster*, 28, *L'expérimental dans la classe*.
- CLARK, G. (1994). Origines de l'homme, le dialogue de sourds. *La Recherche*.
- CONRY, Y. (1993). La formation du concept de métamorphose. In *Georges Canguilhem. Philosophie, historien des sciences*. Paris : Albin Michel.
- COQUIDÉ, M. (éd.) (1998). *L'expérimental en biologie*. Rapport final de la recherche coopérative "L'expérimental dans la classe" coordonnée par C. Larcher. INRP/IUFM Rouen.
- DARLEY, B. (1996). Exemple d'une transposition didactique de la démarche scientifique dans un TP de biologie en DEUG 2^e année. *Didaskalia*, 9, 31-56.
- DEBRU, C. (1990). *Neurophilosophie du rêve*. Paris : Hermann.
- DELBRÜCK, M. (1949). A Physicist looks at biology. *Trans. Conn. Acad. Sci.*, 38, 173-190.
- DESBEAUX-SALVIAT, B. (1983). *Étude de quelques amines biogènes (sérotonine, dopamine, octopamine) dans le cerveau du grillon (Acheta domesticus) : approches méthodologiques*. Mémoire de DEA de Neurosciences, Sciences du Comportement, Université Marseille II.
- DESBEAUX-SALVIAT, B. (1997a). L'histoire du cycle de Krebs. Un exemple de retour aux publications-sources. In J. Rosmorduc (éd.). *Histoire des sciences et des techniques*. Paris : Hachette Éducation.
- DESBEAUX-SALVIAT, B. (1997b). *Un modèle biochimique, le cycle de Krebs : découverte, diffusion, enseignement à l'université et au lycée*. Thèse de doctorat, Université Paris 11.
- DESBEAUX-SALVIAT, B., SALVIAT, N., COQUIDÉ, M. (1997). La respiration du muscle broyé : expériences de Krebs transposées pour l'ExAO. *Biologie-Géologie (APBG)*, 2, 271-283.
- DUBOS, R. (1965). *Man Adapting*. New Haven : Yale University Press.
- FLORKIN, M. (1984). Biochimie. In *Encyclopædia Universalis*. Paris.
- HAECKEL, E. (1877). *Freie Wissenschaft und freie Lehre*. Jena.

- HOPKINS, F.G. (1913). The dynamic side of biochemistry. In *B.A.A.S., 83th meeting* (pp. 652-668). Birmingham.
- JACOB, F. (1970). *La logique du vivant*. Paris : Gallimard.
- JOHSUA, S. & DUPIN J.-J. (1989). *Représentations et modélisations : le débat scientifique dans la classe et l'apprentissage de la physique*. Berne : Peter Lang.
- KREBS, H.A., JOHNSON, W.A. (1937). The role of citric acid in intermediate metabolism in animal tissues. *Enzymologia*, 4, 148-156.
- LAROCHELLE, M. & DÉSAUTELS, J. (1991). "Of course, it's just obvious" : Adolescents' ideas of scientific knowledge. *International Journal of Science Education*, 13, 4, 373-390.
- LASZLO, P. (1993). *La parole des choses ou le langage de la chimie*. Paris : Hermann.
- LEHNINGER, A. (1973). *Biochimie. Bases moléculaires de la structure et des fonctions cellulaires*. Paris : Flammarion.
- MARTINAND, J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, 2, 89-99.
- MARTINAND, J.-L. (éd.) (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP/LIREST.
- MAYR, E. (1982). *Histoire de la biologie*. Paris : Fayard.
- MOULIN A.-M. (1995). In M. Daerou (éd.). *Le système immunitaire* (pp.127-128). Paris : Dossier INSERM, Nathan.
- MORANGE, M. (1994). *Histoire de la biologie moléculaire*. Paris : La Découverte.
- ORANGE, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie. Quels apprentissages pour le lycée ?* Paris : P.U.F.
- POPPER, K. (1963). *Conjecture et réfutation*. Paris : Payot.
- PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. (1979). *La nouvelle alliance*. Paris : Gallimard.
- RAICHVARG, D. (1987). La didactique a-t-elle raison de s'intéresser à l'histoire des sciences ? *Aster*, 5, 3-34.
- RUMELHARD, G. (1979). Le processus de dogmatisation. In A. Giordan, J.-L. Martinand (éds.). *Actes des I^{es} JIES*. Paris : Université Paris VII, LIRESP Éditeur.
- RUMELHARD, G. (1986). *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*. Berne : Peter Lang.
- SALTIEL, É. & VIENNOT, L. (1984). What do we learn from similarities between historical ideas and the spontaneous reasoning students ? In P. Linjse. *The many faces of teaching and learning mechanics*. Utrecht : GIREP/SVO/UNESCO.
- SCHNEEBERGER, P. & RODRIGUEZ, R. (1999). Des lycéens face à une investigation à caractère expérimental : un exemple en Première S. *Aster*, 28, 79-105.
- SIMON, H.A. (1962). The architecture of complexity. *Proc. Amer. Phil. Soc.*, 106, 467-482.

ANNEXE

RÉSUMÉ DE LA CONFÉRENCE DE F.G. HOPKINS (1913)

Dans cette conférence, Hopkins, président de la section physiologie du congrès de Birmingham, déploie des arguments pour promouvoir la biochimie et la faire considérer comme une discipline constituée, distincte de la chimie et de la physiologie. Il formule les problèmes essentiels de la biochimie qu'il présente d'une manière accessible à la logique et à l'expérimentation. Il expose ici sa vision d'ensemble des mécanismes biochimiques, prenant le risque d'affirmer que l'organisme vivant doit être pensé en termes de mécanismes chimiques simples (ce que le mathématicien H. Poincaré appelle la "simplicité cachée"). Il oppose aux vitalistes les arguments d'un réductionnisme constitutif.

Mettant en évidence les lacunes et l'inexploré, il définit les grands axes de recherche future pour le xx^e siècle. Sa faculté d'anticipation est intéressante à analyser à la lumière des orientations qui ont réellement été prises au sein de la recherche en biochimie. Il inscrit sa réflexion dans le cadre d'un réductionnisme explicatif.

Une association souhaitable, celle de la chimie avec la biologie

Hopkins commence par citer celui qu'il considère comme le "père de la chimie animale moderne" : Justus Liebig. En 1837 (exactement un siècle avant l'article de Krebs sur le cycle de l'acide citrique), Liebig faisait remarquer que la biologie trouverait dans la science alors neuve de la chimie organique l'aide la plus grande pour progresser; il s'irritait de l'attitude plus réservée des autres scientifiques de l'époque.

Le divorce regrettable entre la biologie et la chimie persiste jusqu'au début du xx^e siècle. En 1913, la biochimie est une "province frontalière de la science". Il était alors rare de rencontrer un biologiste professionnel capable de comprendre un fait important de métabolisme énoncé en termes de formules structurales. À l'inverse, fort peu de chimistes avaient l'esprit suffisamment ouvert pour apprécier la portée des processus biologiques ou pour s'intéresser à la nature des problèmes qui préoccupaient les biologistes.

Le vivant est constitué de substances simples subissant des réactions compréhensibles

Dans l'étude des processus intermédiaires du métabolisme, Hopkins précise que nous avons affaire, non à des substances complexes qui échappent aux méthodes ordinaires de la chimie, mais à des substances simples subissant des réactions compréhensibles. Par substances simples, il entend des substances dont on peut facilement déterminer la structure et dont le poids moléculaire se situe dans un domaine auquel le chimiste organique est bien accoutumé.

De plus, ce ne sont pas seulement la séparation et l'identification des produits issus du vivant qui sont importants, mais aussi leurs réactions dans le corps, par le côté dynamique des phénomènes biochimiques auxquels ils prennent part.

La biochimie, une science véritable en constant progrès

Nombreux étaient les éminents chimistes qui, en 1913, méprisaient encore la biochimie et considéraient que ses méthodes étaient entachées d'amateurisme et d'imprécision. Cette méfiance (et la supériorité apitoyée qui l'accompagnait) semblaient cependant moins répandues qu'à la fin du XIX^e siècle. Il fallait refuser avec force l'affirmation que de tels défauts étaient dus à quelque chose qui serait inhérent à la matière traitée.

Quand on se place en 1913, de considérables progrès ont été accomplis depuis l'époque de Liebig. La chimie du XIX^e siècle avait laissé de côté des secteurs importants pour le développement de la biochimie. Les besoins de la biochimie étaient à cette époque particulièrement pressants dans trois secteurs :

- le domaine des colloïdes,
- le domaine des catalyseurs,
- l'analyse des substances organiques présentes dans les complexes.

Une révolution considérable dans la pensée de la chimie a coïncidé avec le début de ce siècle. La chimie du vivant a incontestablement bénéficié de cette révolution.

Nombreuses furent les tentatives infructueuses pour fractionner les mélanges colloïdes complexes... D'ailleurs le biochimiste du siècle dernier était en avance sur le chimiste pur, pour analyser et séparer des mélanges organiques complexes.

Le travail accompli à l'époque sur la catalyse enzymatique fut pour l'essentiel un travail de défrichage ; il eut toutefois des applications fort utiles. Vers la fin du XIX^e siècle, il avait pris une grande importance.

Mettre en évidence les pouvoirs de synthèse du corps animal

Hopkins cite les étapes ayant conduit à la connaissance concernant les pouvoirs de synthèse de molécules dans l'organisme animal.

1) La synthèse de l'acide hippurique (11) à partir de l'acide benzoïque et du glycolle

Une idée neuve apparut dans la communauté scientifique à la suite des observations d'Andrew Ure, chimiste et médecin de Glasgow : une substance chimique étrangère introduite dans le corps pouvait entrer dans la machinerie du métabolisme et se transformer en une autre substance. L'administration d'acide benzoïque chez un patient provoquait une augmentation de l'excrétion d'acide hippurique.

Cette découverte déclencha un grand nombre d'observations relatives aux conditions variées qui affectent la synthèse. Bertagnini parvint à **marquer spécifiquement des molécules** dans le but de vérifier que c'est bien la même molécule qui apparaît dans la combinaison. Il marqua l'acide benzoïque avec un groupe nitrate, ce qui donna de l'acide nitrobenzoïque ; il constata l'apparition d'acide nitrohippurique, comme prévu. Dès le début des années 1850, on avait clairement établi que le corps pouvait effectuer

(11) Exemple très détaillé par Hopkins. De nos jours, ce fait n'a qu'une valeur anecdotique : l'acide benzoïque et ses dérivés ne sont pas des métabolites habituels dans l'organisme animal.

une condensation synthétique (inconnue *in vitro*) permettant la production de conjugués moins nuisibles (on le comprit plus tard) que la substance introduite (12).

Un peu plus tard, Mutch montra qu'une préparation de rein totalement dépourvue de cellules intactes pouvait incontestablement hydrolyser l'acide hippurique dans des conditions rigoureusement aseptiques. Des résultats expérimentaux suggèrent que la synthèse de l'acide hippurique se fait probablement par catalyse enzymatique.

Cette synthèse, la plus ancienne que l'on ait mise en évidence dans le corps, n'avait pas, selon Hopkins, une valeur anecdotique. Il pense qu'elle a une importance générale dans tout le corps et dans tout le monde vivant, puisqu'elle implique la liaison amide (13). Or cette liaison amide unit les aminoacides dans la molécule de protéine (14).

Hopkins précise qu'avant d'avoir observé la synthèse hippurique, on pensait que les pouvoirs de synthèse chimique étaient absents de l'animal (15). On a découvert depuis sans cesse de nouveaux exemples de synthèse dans le corps, non seulement à partir de substances étrangères, mais aussi au cours des processus normaux.

D'autres synthèses sont citées par Hopkins :

2) Les synthèses faisant intervenir le soufre

3) Les synthèses de dérivés glucidiques

4) La méthylation

Lutter contre les croyances des vitalistes

Hopkins pense qu'une des raisons qui a conduit le chimiste organique à négliger les problèmes de la biochimie est la conviction profonde que les substances mises en jeu dans le métabolisme animal ont un poids moléculaire si élevé et une structure moléculaire si vague qu'il est impossible de les étudier grâce aux méthodes précises de la chimie.

L'enseignement ancien de la biologie a contribué à répandre l'idée que tous les produits simples que l'on peut trouver dans les cellules ou les tissus sont des déchets ne permettant pas d'interpréter les faits biochimiques fondamentaux. Or, les progrès récents de ce début de siècle montrent que les molécules qui interviennent dans la dynamique chimique des tissus vivants sont d'un caractère simple, que le matériel brut du métabolisme est préparé à partir de substances de poids moléculaire faible.

Bientôt, les biochimistes seront capables de suivre, sur des voies chimiques bien définies, ce qu'il advient dans le métabolisme à chaque acide aminé pris individuellement.

(12) L'idée du marquage des molécules pour suivre le métabolisme est souvent présentée comme récente, l'expérience la plus classiquement citée étant celle de Calvin et Benson ; or l'idée est très ancienne, et les marquages chimiques de molécules sont apparus dès le milieu du XIX^e siècle.

(13) On donne actuellement à la liaison "amide" le nom de *liaison peptidique*.

(14) Hopkins croit avoir trouvé un mécanisme intervenant dans la synthèse des protéines, mais il se trompe.

(15) Comme le rappelle Claude Bernard bien des années avant, dans *l'Introduction à la médecine expérimentale* : "En effet, la théorie régnante à cette époque (...) admettait que le sucre qui existe chez les animaux provient exclusivement des aliments, et que ce sucre se détruit dans l'organisme animal par des phénomènes de combustion, c'est-à-dire de respiration."

Ils pourront aussi déterminer chaque phase dans la série de réactions mises en jeu dans la destruction et l'oxydation graduelles de sa molécule.

Aussi longtemps que l'on a pensé de manière instinctive que l'acide carbonique et l'urée qui quittent le corps se forment à partir d'oxydations se produisant dans le **complexe vague du protoplasme** (16), l'idée de tenter de déterminer à l'intérieur du corps une série de processus commençant avec des substances aussi simples que la tyrosine ou la leucine (donc des acides aminés) restait inconcevable. La conception accordant à de tels processus une importance fondamentale dans le métabolisme était bien loin de venir à l'esprit des scientifiques.

Mais Hopkins dit que le progrès dans la connaissance des voies métaboliques ne pouvait venir que par le travail et la pensée de ceux qui combinèrent à la connaissance chimique un instinct et une sensibilité exercés à l'égard des possibilités offertes par la biologie. Les connaissances sur le devenir des acides aminés ou d'autres substances dans le corps n'ont pu être obtenues que par la combinaison de multiples et ingénieuses méthodes d'étude. Il était à cette époque relativement aisé de déterminer les produits finaux du métabolisme, mais identifier les stades intermédiaires successifs était bien plus ardu.

Comment disséquer la chaîne des événements métaboliques ?

Hopkins précise que le corps est certes capable d'effectuer de nouvelles réactions chimiques dans une certaine limite et sous la pression des circonstances, mais qu'il a généralement affaire uniquement à ce qui lui est habituel. Cette conjoncture a produit plusieurs méthodes de détermination de la nature des produits intermédiaires dans le métabolisme.

Sur l'organisme entier

- 1) On administre des dérivés variés d'une substance physiologique capable de se transformer. Seuls **ceux qui sont pleinement métabolisés sont retenus comme pouvant être des intermédiaires normaux du métabolisme**. Les autres dérivés sont rejetés comme non physiologiques (17).
- 2) On peut aussi administrer des substances dont la structure est voisine de celle des substances physiologiques, mais qui, au lieu de subir une complète décomposition, produisent des dérivés résiduels faciles à identifier.
- 3) On peut enfin administrer une substance normale en quantités excessives, ce qui permet parfois d'obtenir des produits intermédiaires dans les déchets.

Sur des organes isolés

- 1) On peut observer l'accumulation de produits intermédiaires.
- 2) Parfois, on parvient à disséquer la chaîne des modifications métaboliques d'une substance, lorsqu'elles se produisent successivement dans différents organes du corps.

(16) Hopkins fait ici allusion à une conception du métabolisme se rattachant au vitalisme, et qui renonçait à analyser les mécanismes fondamentaux de la cellule vivante.

(17) Les travaux de Krebs ayant conduit à la découverte du cycle de l'acide citrique s'appuient en partie sur des considérations de cet ordre.

Sur des individus souffrant d'“erreurs métaboliques” (matériel expérimental spontané)

Lorsqu'un catalyseur manque, cela entraîne un arrêt dans le processus des événements chimiques et des produits intermédiaires apparaissent.

Trop souvent on a considéré comme négligeables de petites quantités de substances, alors qu'il aurait fallu tenter de les mettre en relation entre elles dans une série dynamique de réactions.

Une erreur de méthode historique est mentionnée par Hopkins : **pendant longtemps on ne s'est intéressé qu'aux produits qui s'accumulent dans les tissus pour trouver les produits intermédiaires du métabolisme** (18). Il est évident que le degré d'accumulation d'une substance ne renseigne pas sur son importance métabolique. Le taux de production de tout produit intermédiaire doit être égal au taux auquel se produit son changement en produit suivant (équilibre dynamique). La quantité d'un produit n'a pas de signification en tant que mesure de l'importance quantitative des événements dynamiques qui lui donnent naissance.

La connaissance du métabolisme intermédiaire

Les expériences d'alimentation sur des animaux jeunes menées par Hopkins ont montré que les bases puriques et pyrimidiques du noyau cellulaire proviennent certainement d'acides aminés particuliers.

La composition d'une seule hormone est connue, celle de l'adrénaline. De structure simple, elle dérive probablement d'un acide aminé aromatique (19). Hopkins prévoit que l'étude des hormones, molécules de grande importance pour la dynamique du corps, formera certainement un chapitre spécial de la biochimie dans le futur (20).

Contre la conception d'un métabolisme en bloc

Hopkins insiste sur l'idée que le métabolisme fonctionne avec des molécules simples. La conception d'un métabolisme en bloc, telle que Garrod l'indique, cède la place à celle du métabolisme compartimenté.

Il existe une opinion ancienne mais encore tenace en 1913, qui conçoit la matière vivante comme une molécule définie très grande et très labile. Hopkins s'insurge contre une telle conception qui inhibe toute pensée créatrice et véhicule le corollaire que des molécules simples telles que celles qui sont apportées par les aliments ne subissent de changement qu'après être devenues une partie d'une molécule géante ou “biogène”. De telles hypothèses sont devenues inutiles depuis qu'on sait qu'une molécule se transforme dans la cellule parce qu'elle y rencontre des enzymes.

Il est clair désormais que la cellule vivante n'est pas une masse de matière composée d'un agrégat de molécules semblables, mais un système hautement différencié où coexistent des phases de constitutions différentes. Plusieurs phénomènes

(18) Cette idée-clé de la non-accumulation des métabolites intermédiaires joue un rôle important dans l'élaboration du concept de cycle métabolique par Krebs.

(19) C'est exact, l'adrénaline est une catécholamine dérivée de la phénylalanine.

(20) On ne peut contester le caractère prophétique de cette affirmation.

chimiques peuvent se produire au même moment dans différentes phases. Il est impossible de dire si l'une des phases est plus essentielle à la vie de la cellule qu'une autre. On peut supposer que le glycogène "métoplasmique" est aussi nécessaire à l'intégrité du métabolisme cellulaire que le matériel nucléaire lui-même.

En dernière analyse Hopkins précise qu'il est difficile même de parler de matière vivante dans la cellule (21). **La vie est l'expression d'un équilibre dynamique particulier.** La vie est une propriété de la cellule prise comme un tout, parce qu'elle dépend de l'organisation des processus et de l'équilibre atteint par la totalité des phases qui coexistent.

Un caractère spécifique de la cellule vivante est l'organisation à l'intérieur d'elle-même de phénomènes chimiques. Hopkins rappelle qu'une théorie fondamentale, appuyée sur des données expérimentales s'est développée depuis une quinzaine d'années : **toute réaction chimique dans la cellule est dirigée et contrôlée par un catalyseur spécifique.**

Pendant longtemps on a considéré que les enzymes ayant des propriétés hydroclastiques (cas des ferments digestifs) étaient les seules normalement présentes dans les cellules (22). La fonction de l'endo-enzyme comme catalyseur universel fut longue à être reconnue. C'est grâce à la découverte par Büchner de la zymase de la fermentation alcoolique hors cellule que l'acception moderne de l'enzyme put s'établir.

Chaque étape dans les processus métaboliques implique un catalyseur distinct. Quand on considère la myriade de réactions qui se produisent dans le corps et la spécificité étroite du domaine d'action de chaque enzyme pris individuellement, il y a de quoi s'extasier.

On dispose, en ce début de XX^e siècle, d'une telle quantité d'exemples, qu'il est logique maintenant de conclure que toutes les réactions métaboliques des cellules sont catalysées par des enzymes et que toutes les réactions métaboliques des cellules peuvent être catalysées dans le sens de la synthèse ou dans le sens de la dégradation (23).

La "simplicité cachée" du vivant offre des pistes de recherche pour l'avenir

"Sous l'extrême complexité du vivant, nous devons découvrir une simplicité qui pour l'instant nous échappe." Hopkins évoque, en français dans le texte, ce que Henri Poincaré appelle la *"simplicité cachée"*.

Les études purement chimiques gagnent alors beaucoup en importance et en signification si on est autorisé à concevoir que la cellule comporte de simples réactions métoplasmiques catalysées par des enzymes. Un réel pas en avant est accompli, parce qu'on échappe au flou des molécules bioplasmiques considérées comme le siège de tout changement.

Toutefois, on risque de trouver une justification suffisante à la thèse vitaliste quand on considère que le système vivant regagne son équilibre après une perturbation, notamment grâce à l'action de catalyseurs néoformés.

(21) Réductionnisme constitutif !

(22) On retrouve cette conception chez la plupart des élèves en début de classe de Première.

(23) Étape de généralisation.

Le chimiste sera frappé par le remarquable mélange de général et de particulier, notamment en immunologie. Il existe en ce domaine des associations par adsorption qui ne sont pas des composés chimiques au sens commun du terme. **Pourtant, l'aspect chimique reste au premier plan pour comprendre les phénomènes du vivant.**

Un jeune chimiste ne pourra devenir un biochimiste que s'il consacre un ou deux ans à l'étude de la biologie. Ce que veulent les chercheurs de cette époque, c'est savoir comment les réactions se passent dans l'organisme. La simple connaissance de la constitution des substances et la considération des possibilités de laboratoire peuvent aider à établir un tel savoir, mais le corps de l'animal crée d'ordinaire l'inattendu. **Les résultats, contrairement à ce qui se passe en chimie-physique ne se prêtent pas à un traitement mathématique** (24). Il faudrait que le biochimiste soit capable de décrire l'animal vivant comme le morphologiste a décrit l'animal mort.

Les méthodes expérimentales de l'époque sont suffisamment élaborées pour permettre une connaissance précise de toutes les étapes du métabolisme. Reste à les mettre en œuvre !

(24) Il n'y a pas de formalisation évidente en biologie, et la situation ne s'est pas véritablement améliorée à la fin du XX^e siècle !

IDENTITÉ DISCIPLINAIRE ET OPINIONS VIS-À-VIS DES SAVOIRS BIOTECHNOLOGIQUES D'ENSEIGNANTS EN SCIENCES HUMAINES ET D'ENSEIGNANTS EN SCIENCES ET TECHNIQUES

Laurence Simonneaux

Les opinions vis-à-vis des applications biotechnologiques sont la clé de voûte des représentations sociales sur les biotechnologies. La construction identitaire des individus marque leurs représentations sociales. Les enseignants en productions animales et végétales ont été formés sur le modèle de l'agriculture intensive. Pour identifier l'influence de l'identité disciplinaire, une étude comparative des opinions, émotions et intentions comportementales d'enseignants de différentes disciplines vis-à-vis de diverses applications biotechnologiques a été menée dans le contexte de l'enseignement agricole. Dans les domaines éthique, sanitaire et environnemental, les opinions des enseignants en sciences humaines divergent de celles des enseignants en sciences et techniques animales et végétales. Les premiers sont plus inquiets que les seconds. Les opinions des enseignants en aménagement, de formation scientifique, se rapprochent de celles des enseignants en sciences humaines.

Après avoir défini la spécificité de la biotechnologie, nous présenterons une recherche qui pose le problème de l'impact de l'origine disciplinaire des enseignants pour traiter des questions biotechnologiques dans le contexte de l'enseignement agricole marqué par de profondes mutations. Les biotechnologies ont des répercussions dans différents champs disciplinaires : en sciences humaines et en sciences et techniques. Nous avons ainsi choisi d'interroger des enseignants en sciences humaines et en sciences et techniques. Nous souhaitons vérifier si l'identité disciplinaire des enseignants influence leurs opinions sur les applications biotechnologiques. Leurs opinions sur des savoirs porteurs de débat peuvent influencer leur enseignement.

1. LES SAVOIRS BIOTECHNOLOGIQUES

1.1. La connotation ambivalente du terme *biotechnologie*

Nous devons le terme *biotechnologie* à un hongrois, Karl Ereky, qui a désigné ainsi, vers la fin de la Première Guerre mondiale, les méthodes d'agriculture intensive.

Bud (1993) remarque que deux sens opposés sont rattachés au terme *biotechnologie*. Le premier sens renvoie à la longue

biotechnologie
= modifications
du vivant pour
l'homme...

... ou
manipulations
génétiques
associées à
l'idée de risque

tradition de modification des caractéristiques du vivant au service de l'homme. On peut, par exemple, qualifier de biotechnologies la fermentation à l'œuvre dans la fabrication du vin, du fromage et de la bière. Les biotechnologies "modernes" ont alors émergé d'un long processus de changements progressifs en agriculture initié par les Babyloniens. Elles ne représentent pas une rupture radicale avec le passé. C'est cette représentation, connotée de conservatisme et de sécurité, que le secteur des biotechnologies (industries, scientifiques, gouvernements) souhaiterait voir adoptée par le public. Le second sens ancre les biotechnologies dans le nouveau champ des technosciences. Dans ce cas, les biotechnologies sont associées à un pouvoir spectaculaire de manipulation génétique permis par les découvertes récentes en biologie moléculaire. Elles bouleversent les pouvoirs de l'homme de modifier la nature et risquent d'entraîner des répercussions environnementales désastreuses.

1.2. Quelques considérations sur la nature particulière des biotechnologies comme objets de savoir

des savoirs
complexes et
non stabilisés

La biotechnologie combine plusieurs sciences : la biologie cellulaire, la biologie moléculaire, la microbiologie, la génétique, la biochimie (elle-même interdisciplinaire) et des procédés d'ingénierie technologique. Toutes ces disciplines coopèrent dans des champs d'application très variés, de l'industrie chimique à l'agriculture, et du domaine médical et de l'industrie pharmaceutique à l'environnement. Les savoirs biotechnologiques sont des savoirs non stabilisés et dont les répercussions, qui peuvent concerner les domaines professionnels, écologiques, politiques, juridiques, économiques éthiques, sanitaires, sont entachées d'incertitudes. À l'instar de nombreux sociologues des sciences, nous considérons que la science et ses applications, en l'occurrence ici la biotechnologie et ses applications, ne peuvent pas être séparées ; le monde de la recherche et celui du développement sont de toute évidence liés. Les savoirs biotechnologiques intègrent donc la biotechnologie et ses applications.

démocratie
cognitive et
enseignement

Se pose, comme l'intitule E. Morin (1998) "*le problème historique, désormais capital, de la démocratie cognitive*". Les questions biotechnologiques s'avèrent polydisciplinaires, multidimensionnelles et, avec la mondialisation croissante, planétaires. L'éducation biotechnologique s'inscrit, nous semble-t-il, dans la mission qu'E. Morin attribue à l'enseignement fondée sur "*la nécessité de fortifier l'aptitude interrogative et de lier le savoir au doute*".

1.3. Les risques éventuels "réels" ou "perçus"

Des recherches portent depuis une vingtaine d'années sur la perception des risques environnementaux, alimentaires et

les risques
"réels" des
experts,

les limites de leur
évaluation...

technologiques par le public dit profane. Leurs résultats montrent que le public n'est pas si ignorant dans l'approche des risques biotechnologiques. Il ne faut pas confondre niveau de connaissance scientifique et compréhension des principaux risques éventuels. Un décalage existe entre les risques "réels", évalués de façon dite "objective" par les experts et les risques dits "subjectifs" perçus par les profanes. Un groupe de chercheurs britanniques a publié en 1999 un rapport sur les OGM s'appuyant sur les résultats du programme de recherche "Global Environmental Change" financé par l'Economic and Social Research Council (ESRC), l'équivalent britannique du département des sciences de l'homme au CNRS (1). L'originalité de ces recherches consiste à analyser conjointement la construction des savoirs mis en œuvre pour la gestion des risques et la perception de ces risques par le public profane. On le sait, la sociologie des sciences a montré comment les savoirs scientifiques incorporent des dimensions sociales et culturelles. Les points de vue de la communauté scientifique ne sont pas forcément adaptés à l'évaluation des risques liés aux biotechnologies. Les scientifiques se concentrent sur leur noyau de certitude dans la production des savoirs, qui ne sont pourtant que les hypothèses les plus valables jusqu'à preuve du contraire, alors que, dans l'évaluation des risques, il est important d'étudier les domaines d'ignorance. "Absence of evidence' of risks is not the same thing as 'evidence of absence'." (2) Les biologistes moléculaires veulent rassurer en déclarant que l'introduction d'un gène dans une plante aura des effets bien plus précis et mieux maîtrisés que ceux qui peuvent être produits par la sélection traditionnelle. La complexité des relations entre différents gènes, et entre le génome, l'environnement cellulaire et l'environnement extérieur n'est pas prise en compte. Et pourtant, le tout génétique est un leurre (Atlan, 1999). "Les connaissances comportant des incertitudes recon- nues dans leur discipline se durcissent souvent en certitudes absolues quand elles passent dans des champs scientifiques voisins, et encore plus quand elles passent chez les politiques ou les industriels." (Marris, 1999). En plus, les conseillers scientifiques des politiques ont souvent dans leur stratégie de carrière d'intégrer ultérieurement les firmes.

La démarche scientifique ne paraît pas pertinente dans l'évaluation des risques du fait de la complexité des questions posées, de l'interaction entre les facteurs, du décalage éventuel entre la cause et l'effet. Sans compter que les scientifiques eux-mêmes ne sont pas très intéressés par ce type de

(1) ESRC Global Environment Change Programme (1999). The politics of GM food : risk, science and public trust. *Special briefing n° 5*, University of Sussex. Ce programme a financé cent cinquante projets de recherche.

(2) ESRC, *ibid.*

recherche peu valorisable en terme de carrière. Le raisonnement scientifique a ainsi exclu de l'analyse des risques les impacts sur les pratiques agricoles. Les facteurs socioprofessionnels sont négligés.

Ces recherches montrent que les profanes ont une perception plus complexe des risques que les experts. Les experts évaluent la probabilité d'un événement néfaste et en mesurent les conséquences en termes quantitatifs selon la formule suivante :

$$\text{risque (conséquences/unité de temps)} = \text{probabilité (événement/unité de temps)} \times \text{conséquences (conséquences/événement)}$$

les risques
"perçus"
des profanes

Les profanes, eux, intègrent dans leur définition du risque des critères plus qualitatifs ; ils s'intéressent plus à la nature des conséquences qu'à leur probabilité (Marris, 1999). L'évaluation des risques varie par exemple selon que le risque est imposé ou volontaire, que les incidences touchent ou non les générations futures.

Les principaux résultats de ces recherches sont les suivants :
- Le public profane est en avance sur de nombreux scientifiques et politiques dans sa demande de l'application du principe de précaution.

- Les questions éthiques et écologiques sont centrales pour le public.

- Le public est méfiant vis-à-vis de la science, du fait des événements récents (ESB, sang contaminé, ...) ; il n'a pas confiance dans l'approche scientifique de l'ignorance : des facteurs inconnus peuvent produire des surprises dans le futur. Puisqu'il ne se sent pas capable d'évaluer les risques, il a tendance à mal juger ceux qui les créent.

principe de
précaution

- Le public n'a pas confiance dans les firmes. Ce sont, pour les profanes, des tricheurs qui ont mélangé le soja transgénique à du soja conventionnel. Elles ont déclaré qu'il n'était pas possible de distinguer le soja transgénique dans sa composition du soja conventionnel ; mais dans un second temps, pour rassurer les consommateurs, elles ont affirmé que des tests ont été mis au point qui permettent de détecter la présence d'1 % de graines transgéniques.

- Les modalités de contrôle sont jugées insuffisantes.

- La mondialisation du commerce induit l'utilisation des biotechnologies ; en retour, l'inquiétude porte sur la disparition des petites exploitations dans le monde.

1.4. Des résistances européennes en partie fondées sur l'histoire contemporaine

Les biotechnologies s'inscrivent dans une histoire contemporaine qui a été marquée par les dérives eugéniques et racistes. Par ailleurs, l'expertise scientifique n'est plus crédible : elle est soupçonnée d'irresponsabilité, d'imprudence, voire de dépendance par rapports aux intérêts économiques. Les affaires du sang contaminé, de l'amiante, de la "vache folle"

des résistances multiples

ont entamé la confiance du public dans les systèmes d'évaluation scientifique des risques et des systèmes de décision de mise en œuvre du principe de précaution.

Le refus des OGM est aussi parfois la manifestation du refus du caractère inéluctable de la mondialisation, comme l'ont confirmé les manifestations de Seattle qui ont rassemblé les opposants aux OGM et à l'OMC. Dans les pays nordiques, notamment en Allemagne, les mouvements écologiques des Verts s'opposent fermement aux manipulations de la Nature.

Ainsi donc, la biotechnologie est un terme polysémique qui définit la combinaison de plusieurs sciences, dont la vocation est la modification du vivant au service des besoins de l'homme (l'*homo economicus* fait partie du genre humain), qui a des applications dans de nombreux domaines, et dont les risques "réels" ou "perçus" engendrent des résistances.

2. CADRE THÉORIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

Les développements biotechnologiques peuvent avoir des répercussions variées, positives et/ou négatives, prévisibles ou imprévisibles, contrôlables ou incontrôlables. L'opinion vis-à-vis des applications biotechnologiques est marquée par les répercussions (réelles ou imaginaires) envisagées par les individus. Nous nous intéressons ici aux représentations sociales des enseignants. En particulier, nous questionnons l'impact de l'identité disciplinaire des enseignants sur leurs opinions vis-à-vis des biotechnologies.

Dans l'enseignement agricole en France, ce sont traditionnellement les enseignants en sciences et techniques (c'est-à-dire les enseignants en biologie, productions animales et végétales) qui traitent les biotechnologies en classe.

les biotechnologies sont absentes des programmes d'enseignement agricole

Les biotechnologies n'ont quasiment pas été intégrées dans les programmes d'enseignement agricole. Ce fait en soi nous interpelle ; ainsi il n'est prévu dans l'enseignement agricole aucune formation, ni même information sur les biotechnologies pour les futurs exploitants agricoles ou les futurs techniciens agricoles qui seront en partie chargés de la mission de vulgarisation technique dans les exploitations.

Une enquête réalisée auprès de tous les établissements de l'enseignement agricole en France nous a montré qu'en dépit de l'absence des biotechnologies dans les programmes, les enseignants confrontés aux questions des élèves abordent les biotechnologies sur le plan scientifique et technique, mais ils se sentent mal à l'aise et évitent de traiter les répercussions sociétales. Par ailleurs, ils ne coopèrent pas (ou peu) avec les enseignants en sciences humaines pour aborder les questions sociétales liées aux biotechnologies (Simonneaux, 1998a). Ils ont été formés sur le modèle de l'intensification

face aux questions
des élèves
les enseignants
se limitent
au plan
scientifique
et technique

en agriculture. Leur identité disciplinaire s'est construite au cours de cette formation initiale. Les remises en cause du système productiviste ont des répercussions sur la légitimité de leur enseignement. Les programmes ont intégré les questions environnementales, mais les enseignants manquent de références pour les traiter. Et la nouvelle Loi d'Orientation Agricole place au cœur du système les questions de durabilité et de territorialité. Comment les enseignants en sciences et techniques de l'enseignement agricole perçoivent-ils les biotechnologies ? À travers leur appartenance disciplinaire fondée sur leur formation productiviste ? Ou bien les ruptures du monde agricole ont-elles influencé leurs points de vue sur cette technologie ? Leurs représentations des biotechnologies se distinguent-elles de celles des enseignants en sciences humaines de l'enseignement agricole qui pourraient contribuer à l'enseignement des biotechnologies ? C'est à Moscovici (1961, 1976) qu'on doit le concept de représentation sociale. La représentation sociale contribue "aux processus formateurs et aux processus d'orientation des conduites et des communications sociales (...) L'attitude qui les (les conduites) sous-tend et sélectionne les informations nécessaires à la formation des systèmes cognitifs est comme la clé de voûte de l'ensemble, ou la condition première." Les attitudes influencent potentiellement les conduites. Si les attitudes des enseignants de diverses disciplines vis-à-vis des biotechnologies sont différentes, leurs conduites d'enseignement peuvent être dissemblables. La représentation sociale est un processus à la charnière du social, de l'affectif et du cognitif qui forme un cadre interprétatif. La représentation sociale est aussi un produit, car elle est constituée de croyances et d'opinions organisées autour d'une signification centrale et par rapport à un objet donné. Son étude s'aborde alors à partir des attitudes et des opinions, "clés de voûte" de la représentation selon Moscovici, qui introduisent une dimension normative et évaluative à partir de laquelle les informations sont pondérées et évaluées par le sujet. Les biotechnologies, nous l'avons vu, soulèvent des polémiques, des angoisses et des enthousiasmes. Les représentations sociales des individus à leur propos sont marquées par les valeurs qui y sont associées. Elles déterminent les attitudes et les opinions. À l'instar de Lewis *et al.* (1997), nous utilisons le terme "opinion" pour désigner les valeurs attachées à des questions particulières dans des contextes spécifiques, et le terme "attitude" en référence à des valeurs d'ordre plus général. Par exemple, à propos de la transgénèse animale, considérer que la fabrication de vaches transgénétiques capables de produire du lait humanisé dans les pays industrialisés est inacceptable est une opinion ; et considérer que produire des animaux transgénétiques est éthiquement inacceptable quelles que soient les circonstances est une attitude. Les représentations sont une forme de médiation entre un objet et un sujet. En plus du processus cognitif, l'origine

les attitudes, clés
de voûte des
représentations
sociales

socioculturelle et la place du sujet dans le contexte social vont déterminer l'interprétation de l'objet par le sujet. Les représentations sociales permettent aux membres d'un groupe d'avoir une vision commune du monde, donc de penser et d'agir de façon uniforme, et ainsi de préserver des liens entre eux (3). Jodelet (1989) définit les représentations sociales comme *“une forme de connaissance socialement élaborée et partagée ayant une visée pratique et concourant à la construction d'une réalité commune”*. Cette définition propose une dimension cognitive (les connaissances) et sociale (socialement élaborée et partagée) qui permet l'action (visée pratique).

Le champ social, déterminé par un contexte idéologique et historique, va transmettre un cadre d'analyse des représentations en véhiculant un système de valeur. Les représentations sont fortement reliées au système de valeur des individus. L'idéologie dominante, réappropriée, devient discours du sujet dans la mesure où le sujet assimile le système de valeur dominant. Par ce processus, le système de référence prédominant tend à l'hégémonie d'un système de valeur.

la constitution
identitaire
marque les
représentations
sociales

La vie d'un groupe va déterminer la position de l'individu dans ce groupe, sa plus ou moins grande intégration, adhésion, opposition ou indépendance face au système de valeur du groupe. Le rôle social, qui varie dans la vie de l'individu, est déterminant dans l'assimilation ou le rejet du système de représentations dominant. Les représentations contribuent à la construction d'une réalité sociale commune, elles sont élaborées dans un contexte social auquel adhère plus ou moins l'individu qui s'approprie ces représentations. L'idée de représentation sociale renvoie à la manière dont se structure un groupe social par rapport à un objet. Dans ce sens, elle s'inscrit davantage dans une logique identitaire que conceptuelle (Astolfi, 1999). Les représentations sociales nous amènent à nous intéresser à la notion d'identité puisqu'elles deviennent partie intégrante de la perception qu'a l'individu de lui-même et du groupe auquel il appartient (en l'occurrence, les groupes disciplinaires d'enseignants) (Simonneaux, 2000). On rejoint ici la position de Dubar (1991) qui affirme que la compréhension de la construction des identités passe par la *“compréhension interne des représentations”*.

Les mutations agricoles en France

Les enseignants en sciences et techniques dans l'enseignement agricole voient leur identité professionnelle ébranlée

(3) Mais les expériences sociales n'excluent pas les expériences propres qui permettent à un individu de forger sa façon personnelle d'appréhender la réalité en ajustant en permanence son système de représentations aux situations particulières qu'il rencontre.

par les mutations techniques, économiques, sociales et culturelles du monde rural (Simonneaux, 1999). Résumons tout d'abord ces profondes mutations.

En 1945, a émergé un modèle de développement agricole sur la base d'une agriculture mécanisée, motorisée et "chimique", qui visait d'abord la quantité par l'augmentation de la productivité, notamment du travail, la "technicité" et l'intensification, l'intégration de l'agriculture au reste de l'économie, et enfin l'harmonisation matérielle et culturelle des modes de vie. Des moyens scientifiques, techniques, économiques et politiques ont été mobilisés : création de l'INRA, "révolution fourragère", insémination artificielle, contrôle des performances, rénovation des bâtiments, plans de lutte contre les maladies du bétail, développement de l'industrie des aliments du bétail, émergence d'une industrie des produits... Et parallèlement, on a assisté au progrès de l'industrie agroalimentaire, la distribution de masse et la grande distribution se sont développées.

L'INRA est alors créé sur des bases "scientifiques", sur la fascination des modèles nord-américains. Les enseignants en agronomie ont été formés à cette école.

Dans les années 80, les limites du système "productiviste" s'imposent à travers différents indicateurs : surplus et stocks pesant sur le budget communautaire, marchés affectés par différentes "crises" ; concentration des productions sur certaines zones, en relation avec des atteintes à l'environnement dans ces territoires et la désertification dans d'autres ; nombre croissant d'éleveurs "en difficultés"... Et de nouvelles demandes sociales s'expriment en matière d'espace, de produits, de conditions de production, de "durabilité".

Malgré tout, les fonds alloués à la recherche agronomique alimentent des politiques de recherche en agriculture intensive, en biotechnologie. Les aides européennes encouragent toujours l'intensification. Et les enseignants, déstabilisés, manquent de références scientifiques pour traiter des voies alternatives.

Les enseignants, tout comme les acteurs du développement agricole, ont vu la rationalité de leurs enseignements, pour les premiers, et de leurs conseils, pour les seconds, remise en cause par les bouleversements qui agitent le monde agricole. Deux rationalités se superposent : l'une, dans la ligne directe de celle qui a présidé au cours de la Révolution Verte, est fondée sur l'intérêt du développement des techniques ; l'autre, ébranlée à la fois par la dégradation du contexte économique et par la demande sociale en matière d'environnement et de qualité des produits, légitime les voies de la diversification, de la recherche de nouveaux produits et services (vente directe, tourisme rural...).

Les enseignants ont le sentiment de risquer de ne plus être reconnus compétents par leurs élèves s'ils n'ont pas un discours techniciste, s'ils les amènent à comparer des

les mutations
agricoles...

... ont-elles
un impact sur
l'identité des
enseignants ?

crise identitaire
chez les
enseignants
en sciences
et techniques

systèmes de production sans donner de solution idéale. D'une certaine façon, certains se sentent même responsables d'avoir accompagné avec zèle la "normalisation" des exploitations.

À titre d'illustration du "mal être" identitaire exprimé par les enseignants en zootechnie, reprenons les propos d'une enseignante. Après avoir énuméré des thèmes à enseigner qui la préoccupent (durabilité, bien-être animal, système d'élevage), tous par nature interdisciplinaires, elle résume ainsi l'ambiguïté vécue par ces professionnels : *"Je suis étonnée que les enseignants ne soient pas plus sensibilisés à ces problèmes, trop souvent, les zootechniciens se tiennent au courant des dernières données techniques mais négligent les autres aspects de l'élevage. Nous sommes en fait les enfants du productivisme et la remise en cause est rude, nous restons fascinés par les performances et oublions le reste."*

Les avis varient en ce qui concerne l'influence de la société et de l'environnement sur la construction des points de vue des sujets. Certains sociologues (Schutz, 1962; Berger & Luckman, 1967) estiment que les individus construisent leurs propres représentations de la réalité; et des psychologues (Bandura, 1977) ont théorisé la façon dont l'individu interagit avec son environnement pour construire un nouvel apprentissage ou un comportement. Pour ces derniers, les croyances des individus sont influencées par les sentiments dominants dans la société dans laquelle ils vivent. Contrairement à Skinner (1953), Ausubel (1968) et Beck (1976) insistent sur le rôle que joue l'individu sur le développement de ses propres points de vue.

Les enseignants de l'enseignement agricole ont-ils été ébranlés de la même façon, quelle que soit leur discipline d'appartenance, par les mutations du monde agricole? On peut formuler quelques hypothèses. Certes, les enseignants en production animale et végétale ont été heurtés de plein fouet par l'émergence des limites du modèle agricole de l'après-guerre; une crise identitaire est apparue du fait du décalage entre leur culture disciplinaire et les nouvelles demandes sociales. La formation des enseignants en biologie les a souvent peu conduits à envisager les articulations entre les savoirs biologiques de référence et leurs applications techniques. Les enseignants en aménagement ont été formés à une discipline en émergence liée aux problématiques de gestion et d'aménagement de l'espace engendrées par les limites du modèle productiviste. De formation scientifique, ils sont au cœur des préoccupations environnementales. Les enseignants en économie et en histoire-géographie, mieux préparés par leur formation, ont su sans doute mieux analyser et intégrer les évolutions de l'agriculture. Quant aux enseignants en langues vivantes, bien que non spécialistes des questions agricoles, soucieux d'ancrer leur enseignement dans les enjeux agricoles, ils exploitent volontiers des articles d'actualité sur les biotechnologies (4).

l'aménagement,
discipline née
des limites
du modèle
productiviste

Quels sont les liens potentiels entre la crise identitaire vécue par les enseignants en agronomie (les agronomes sont les enseignants en productions végétales, animales et en aménagement) et leurs opinions sur les biotechnologies? En d'autres termes, comment considèrent-ils les biotechnologies? Comme une technologie qui s'inscrit dans une logique productiviste positive ou comme une technologie qui bouleverse les pouvoirs de l'homme de modifier la nature et risque d'entraîner entre autres des répercussions environnementales désastreuses? Leurs points de vue sont-ils plus influencés par les craintes soulevées par les limites du système productiviste ou par l'enthousiasme qui s'ancre dans leur culture disciplinaire productiviste?

les représentations des biotechnologies sont-elles différentes selon les disciplines?

Nous souhaitions vérifier si l'identité disciplinaire des enseignants influence leurs opinions sur les applications biotechnologiques. Nous récusons l'idée que les enseignants sont neutres. Pour nous, leurs opinions influencent, consciemment ou non, leur enseignement. Les biotechnologies ont des répercussions dans différents champs disciplinaires : en sciences humaines et en sciences et techniques. Nous avons ainsi choisi d'interroger des enseignants en sciences humaines et en sciences et techniques. Face aux lacunes des programmes de l'enseignement agricole en France sur l'enseignement des biotechnologies, les prédispositions identitaires des enseignants, si elles existent, auront une influence majeure dans leur enseignement. Nous voulions tenter d'identifier avec quelles émotions ces opinions sont liées, et quelles sont leurs intentions comportementales.

3. MÉTHODE ET RÉSULTATS

Pour identifier l'influence de la culture disciplinaire des enseignants, nous avons procédé à une étude comparative des opinions des enseignants de différentes options disciplinaires sur diverses biotechnologies. Nous avons ainsi choisi d'interroger des enseignants en sciences humaines (économie, histoire-géographie, langues vivantes) et en sciences et techniques (biologie, productions animales, productions végétales et aménagement) parce que, dans l'enseignement agricole, les premiers sont susceptibles de participer à l'enseignement des biotechnologies sur les questions sociétales, et les seconds sont ceux qui traitent à présent des aspects scientifiques et techniques des biotechnologies. Quand elles sont enseignées, c'est-à-dire quand les enseignants prennent sur le temps qui leur est compté pour

(4) Nous l'avons mis en évidence dans des études précédentes réalisées dans le cadre de l'European Initiative for Biotechnology Education.

répondre aux attentes des élèves qui posent des questions sur des savoirs très médiatisés, les biotechnologies végétales et animales sont essentiellement enseignées par les enseignants agronomes ; les biotechnologies médicales par les biologistes et les biotechnologies agroalimentaires par les biologistes et les agronomes. Seules les biotechnologies dans le secteur de l'industrie chimique ne sont pas abordées du tout dans l'enseignement agricole.

3.1. La population interrogée

L'étude a porté sur 105 enseignants en début de formation à l'ENFA. Il s'agit de professeurs-stagiaires issus de concours réservés. Ils ont donc tous au moins une expérience d'enseignement de quatre ans.

Tableau 1. Répartition des enseignants selon les disciplines

| Disciplines | Nombre |
|-----------------------|--------|
| Sciences économiques | 25 |
| Langues vivantes | 16 |
| Histoire géographie | 9 |
| Biologie | 14 |
| Productions animales | 20 |
| Productions végétales | 14 |
| Aménagement | 7 |

3.2. Les dix applications des biotechnologies proposées dans le questionnaire

Le questionnaire comportait 95 questions. Nous nous sommes partiellement inspirée d'un questionnaire utilisé par le département de psychologie et de linguistique de la Faculté de Gestion Technologique de l'Université de Technologie d'Eindhoven.

La première partie porte sur différentes applications des biotechnologies. Pour vérifier l'influence du secteur d'application des biotechnologies et l'influence de la finalité visée, neuf champs d'application ont été choisis : agriculture et diversification des fruits et légumes, agriculture et amélioration des produits, nouvelles biotechnologies en élevage, médecine vétérinaire, santé humaine et diagnostic, santé humaine et médicaments, industrie agroalimentaire et applications nouvelles, industrie agroalimentaire et production de matières premières, industrie chimique et protection de l'environnement. Dix applications concrètes couvrent ces neuf champs d'applications. Sur les nouvelles biotechnologies en élevage, champ des plus controversés, deux applications sont proposées.

neuf champs
d'application
jugés

Tableau 2. Les dix applications des biotechnologies proposées

| Champ d'application | Application | Abréviation |
|---|--|-------------------|
| Agriculture et diversification des fruits et légumes | 1 - La fusion de cellules de diverses variétés de chou pour cultiver de nouvelles variétés de chou qui peuvent pousser dans différents milieux | Chou |
| Agriculture et amélioration des produits | 2 - La modification génétique de plants de tomate pour cultiver des tomates plus fermes qui ont une durée de conservation plus longue en rayon | Tomate |
| Nouvelles biotechnologies en élevage | 3 - Le clonage animal | Clonage |
| | 4 - La modification génétique de bactéries avec du matériel génétique bovin permettant à ces bactéries de produire des hormones de croissance bovines qui peuvent être données à des vaches pour augmenter leur production laitière | Hormone/lait |
| Médecine vétérinaire | 5 - La modification génétique de vaches avec du matériel génétique humain permettant aux vaches de lutter contre la mammite | Mammite |
| Santé humaine et diagnostic | 6 - La fusion de cellules de souris (cellules tumorales) avec d'autres cellules de souris qui produisent une substance particulière afin de produire cette substance qui permet de tester les tissus humains pour la transplantation d'organes | Transplant organe |
| Santé humaine et médicaments | 7 - La modification génétique de rats avec du matériel génétique humain qui permet aux rats de produire une substance capable de dissoudre les caillots de sang humain | Caillot |
| Industrie agroalimentaire et applications nouvelles | 8 - L'utilisation de bactéries pour produire une substance nécessaire à la fabrication d'aspartame (un édulcorant) | Aspartame |
| Industrie agroalimentaire et production de matières premières | 9 - La modification génétique d'un type de levure avec du matériel génétique bovin pour que la levure produise de la chymosine pour remplacer la présure naturelle utilisée dans la fabrication du fromage | Chymosine |
| Industrie chimique et protection de l'environnement | 10 - L'utilisation de bactéries pour produire la matière première de plastiques biodégradables | Plastique |

Les professeurs-stagiaires devaient déclarer s'ils étaient ou non d'accord avec les affirmations suivantes :

- Cette application aura un effet positif sur l'économie.
- Cette application aura un effet négatif sur l'environnement.
- Cette application améliorera la santé humaine.
- Cette application dépasse les limites éthiques acceptables.
- Cette application pourra affecter la santé humaine.

Les réponses sont considérées comme des arguments justifiant les opinions exprimées.

Ensuite, étant donné l'importance du registre émotionnel dans le cadre des biotechnologies, pour identifier avec quelles émotions sont liées les opinions, il était demandé aux enseignants d'indiquer s'ils étaient enthousiastes ou anxieux vis-à-vis des applications proposées.

Enfin, deux questions visaient l'identification de leur intention comportementale (respectivement positive et négative) : achèteraient-ils, ou utiliseraient-ils, les produits issus des différentes applications biotechnologiques ? S'engageraient-ils dans un mouvement de protestation contre les différentes applications ? Ces quatre derniers items cherchaient à évaluer le degré d'acceptation des différentes applications proposées.

3.3. Opinions de professeurs-stagiaires de différentes disciplines sur les applications biotechnologiques proposées

Nous examinerons d'abord les réponses des enseignants toutes disciplines confondues.

En interprétant le tableau 3, il faut tenir compte du fait que certaines assertions sont connotées négativement, et d'autres positivement. Ainsi, un score élevé à la première question signifie que de nombreux enseignants estiment que l'application en question aura un effet positif sur l'économie, et un score élevé à la deuxième question signifie que de nombreux enseignants jugent que l'application aura un effet négatif sur l'environnement.

Globalement, les enseignants jugent plutôt positivement les répercussions des applications en médecine humaine et celles liées à la production de matière première pour la fabrication de plastique biodégradable. Ils jugent plutôt négativement les répercussions des applications en agriculture, en élevage, en médecine vétérinaire et celles liées à la production de chymosine par génie génétique. Leur opinion est plus partagée en ce qui concerne l'utilisation de bactéries pour produire une substance nécessaire à la fabrication d'aspartame.

Le tableau 4 montre que c'est vis-à-vis des applications en médecine humaine et de la production de matière première pour la fabrication de plastique biodégradable que les intentions d'achat ou d'utilisation sont les plus fréquentes. Elles soulèvent un relatif enthousiasme et une relative inquiétude.

les opinions
diffèrent selon
les applications
envisagées...

Tableau 3. Pourcentages d'enseignants (toutes disciplines confondues) d'accord avec les différentes répercussions envisagées des différentes biotechnologies évoquées et différences significatives (χ^2) selon les applications

| | chou | tomate | clonage | hormone/ lait | mammite | transplant organe | caillot | aspartame | chymosine | plastique |
|-----------------------------------|-----------|-----------|------------|------------------|------------|----------------------|------------|------------|-----------|-----------|
| Effet positif sur l'économie | 49 | 61 | 34 * | 50.5 | 49 | 34.9 | 35.8 | 51.6 | 48.3 | 82 ** |
| Effet négatif sur l'environnement | 54.8 | 53.4 | 54.6 | 63.1 | 43.4 | 15 ** | 16.9 ** | 34.4 * | 46.4 | 17 ** |
| Effet positif sur la santé | 8.6 ** | 2 ** | 14.8 ** | 6 ** | 11.3 ** | 77.3 ** | 83 ** | 24.7 ** | 5.3 ** | 25 ** |
| Effet négatif sur l'éthique | 35.7 * | 35.4 * | 74.2 ** | 68.6 ** | 65 ** | 16 ** | 33.9 | 29.3 ** | 42 | 8 ** |
| Effet négatif sur la santé | 60 ** | 57.7 | 67 ** | 81.7 ** | 54.7 | 39.6 | 50 | 58.2 | 63.6 | 22 ** |

Tableau 4. Émotions (enthousiasme et inquiétude) et intentions comportementales (achat/utilisation et engagement dans des mouvements de protestation) exprimées par les enseignants (toutes disciplines confondues) en %

| | chou | tomate | clonage | hormone/ lait | mammite | transplant organe | caillot | aspartame | chymosine | plastique |
|-----------------------|------------|------------|------------|------------------|------------|----------------------|------------|------------|------------|-----------|
| Enthousiasme | 11.1 ** | 10 ** | 10 ** | 4.9 ** | 6.6 ** | 40.5 | 28.3 * | 9.6 ** | 4.2 ** | 59 |
| Inquiétude | 61.6 | 60 | 78.2 ** | 79 ** | 70.7 ** | 30.1 * | 38.6 | 41.4 | 60.2 | 26 ** |
| Achat/ utilisation | 35 ** | 23 ** | 23 ** | 13 ** | 13.2 ** | 63.2 ** | 58.4 ** | 16.3 ** | 18.4 ** | 78 ** |
| Protestation | 28.7 ** | 32.6 ** | 45.2 | 49.4 | 33 | 6.6 ** | 10.3 ** | 12.2 ** | 29.6 ** | 3 ** |

* différence significative

** différence très significative

Malgré l'expression d'un faible enthousiasme (chez 5 à 11 % des enseignants) et celle d'une forte inquiétude (chez 60 à 79 % des enseignants), des intentions d'achat ou d'utilisa-

... les sentiments
aussi

tion liées aux applications en agriculture, en élevage et en médecine vétérinaire sont déclarées par 13 à 35 % des enseignants. Globalement, les expressions d'inquiétude et les intentions hostiles d'engagement dans des mouvements de protestation contre toutes les applications, sauf celles associées à la médecine humaine et à la fabrication de plastique biodégradable, sont plus fréquentes que celles d'enthousiasme et d'intentions d'achat ou d'utilisation.

Les résultats exprimés en moyennes écrasent les disparités entre disciplines. Le tableau 5 nous permet de différencier les réponses selon les disciplines d'enseignement pour les six applications pour lesquelles des différences significatives sont constatées.

Il n'existe aucune différence significative entre les opinions des enseignants des différentes disciplines à propos des applications biotechnologiques 4, 5, 6 et 10 : la modification génétique de bactéries avec du matériel génétique bovin permettant à ces bactéries de produire des hormones de croissance bovines qui peuvent être données à des vaches pour augmenter leur production laitière, la modification génétique de vaches avec du matériel génétique humain permettant aux vaches de lutter contre la mammites, la fusion de cellules de souris (cellules tumorales) avec d'autres cellules de souris qui produisent une substance particulière afin de produire cette substance qui permet de tester les tissus humains pour la transplantation d'organes, l'utilisation de bactéries pour produire la matière première de plastiques biodégradables.

pour six
applications,
les enseignants
en sciences
humaines sont
les plus inquiets

Globalement les enseignants en sciences humaines (économie, langues vivantes et histoire/géographie) ont des opinions différentes de celles des enseignants de formation scientifique et/ou technique (en biologie, en productions animales et végétales). Les premiers sont plus inquiets que les seconds. Les enseignants en biologie sont les moins inquiets vis-à-vis du développement des applications biotechnologiques. Paradoxalement, les opinions exprimées par les enseignants en aménagement, bien que de formation scientifique, se rapprochent de celles exprimées par les enseignants en sciences humaines. Leur formation les a conduit à prendre en compte les répercussions sociétales des projets d'aménagement. Est-ce ce qui les amène à exprimer davantage de préoccupations sociales sur les applications biotechnologiques ? Ils ne construisent peut-être pas seulement leur jugement sur les faits scientifiques qui fondent les biotechnologies. Ils élaborent peut-être leur point de vue à partir d'une démarche systématique qui intègre des domaines de préoccupation variés et différentes catégories d'acteurs sociaux.

Dans les domaines environnementaux, éthiques et en santé humaine, on observe des différences d'opinions significatives entre les enseignants des différentes disciplines, ainsi que sur les intentions d'engagement dans des mouvements de protestation.

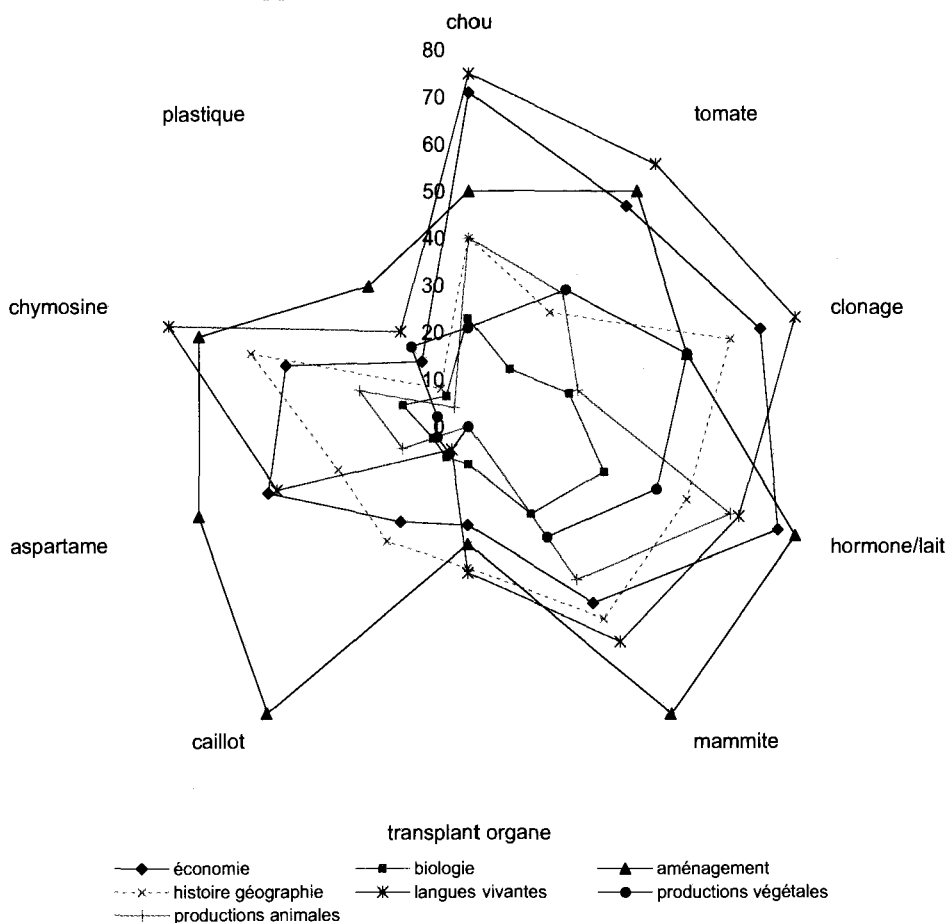
Tableau 5. Différences significatives (χ^2) sur les opinions déclarées vis-à-vis des différentes applications biotechnologiques selon les disciplines des enseignants

| | chou | tomate | clonage | caillot | aspartame | chymosine |
|--|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Effet négatif sur l'environnement | Eco-LV/ Bio-PV * | | Eco-LV/ Bio-PA * | Amgt/ tous autres ** | | Amgt- LV/Bio- PA-PV ** |
| Effet négatif sur le plan éthique | Eco-LV- HG /Bio- PV-PA ** | Eco-LV/ Bio-PV- Amgt * | | | | Eco- Amgt- HG/Bio- PA ** |
| Effet négatif sur la santé | Eco-LV/ PV * | LV-HG/ PV-PA * | | | LV- Amgt/ Bio-PV ** | HG-LV/ PV * |
| Protestation | | | Eco- Amgt- HG/PA- PV * | | | |
| <p>Eco = économistes ; LV = enseignants en langues vivantes ; Bio = biologistes ; PA = enseignants en productions animales ; PV = enseignants en productions végétales ; Amgt = enseignants en aménagement ; HG = historiens-géographes. * signifie que les enseignants de différentes options disciplinaires ont une opinion significativement différente sur la répercussion envisagée pour l'application biotechnologique en question. ** signifie que les enseignants de différentes options disciplinaires ont une opinion significativement très différente sur la répercussion envisagée pour l'application biotechnologique en question.</p> | | | | | | |

En déclinant les opinions par domaine (environnement, santé humaine, éthique), les émotions exprimées (inquiétude) et les intentions affichées (protestation), voyons comment se répartissent les réponses des enseignants des différentes disciplines.

Sur les effets négatifs sur l'environnement (graphe 1), les avis sont partagés. Les enseignants en sciences humaines (économie, langues vivantes, histoire-géographie) ne partagent pas les opinions des enseignants en sciences et techniques (biologie, productions animales et végétales). Les premiers sont plus inquiets que les seconds sur les répercussions négatives en matière d'environnement des applications

Graphe 1. Pourcentages d'enseignants des différentes disciplines qui jugent que les diverses applications ont des effets négatifs sur l'environnement

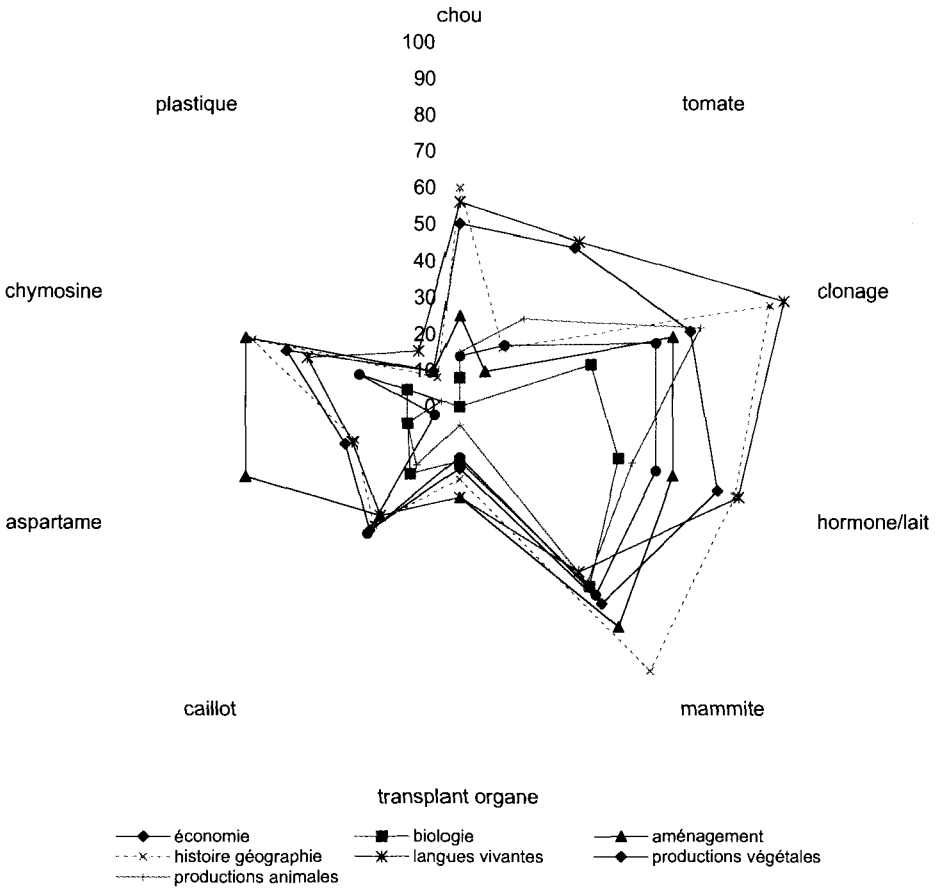


en agriculture, en élevage, en médecine vétérinaire et sur la production de chymosine par génie génétique. Les opinions des enseignants d'économie et de langues vivantes sont significativement différentes de celles des enseignants en biologie et en productions végétales sur les effets environnementaux de la production de chou par fusion cellulaire. Les opinions des enseignants d'économie et de langues vivantes sont significativement différentes de celles des enseignants en biologie et en productions animales sur le clonage. Là encore, les enseignants en aménagement se distinguent ; ils sont plus inquiets que tous les autres enseignants sur les répercussions environnementales de la production d'hormones de croissance bovines par génie génétique, de la fabrication de vaches transgéniques capables de lutter contre les mammites, de la fabrication de rats transgéniques pour la produc-

les enseignants en aménagement se distinguent parmi les enseignants scientifiques

tion d'une substance capable de dissoudre les caillots humains, de la fabrication d'aspartame par génie génétique. Les opinions des enseignants en aménagement et en langues vivantes sont significativement très différentes de celles des enseignants en biologie, en productions animales et végétales sur la fabrication de chymosine ; et les opinions des enseignants en aménagement sont significativement très différentes de celles de tous les autres enseignants sur la production d'une substance capable de dissoudre les caillots humains.

Graphe 2. Pourcentages d'enseignants des différentes disciplines qui pensent que les diverses applications dépassent les limites éthiques acceptables

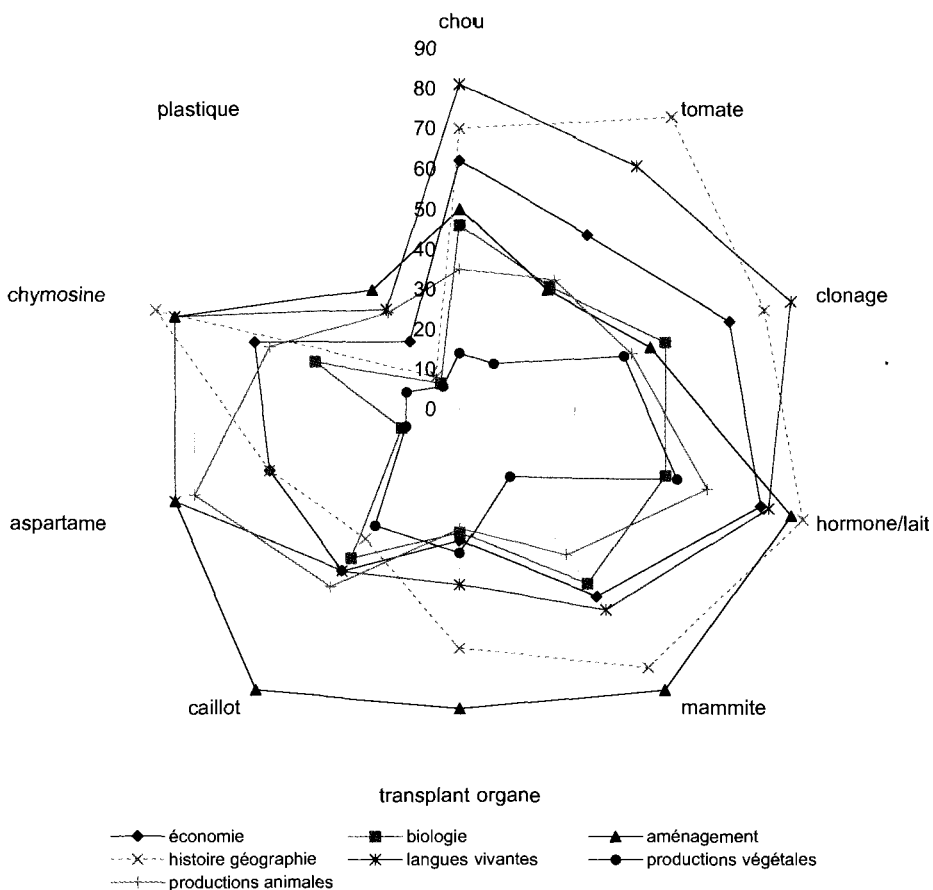


C'est sur les applications en élevage et en médecine vétérinaire que les enseignants estiment que les limites éthiques acceptables sont dépassées (graphe 2). Le type d'application a une grande influence sur les opinions exprimées. Les ensei-

différences
selon les
disciplines
également
pour les limites
éthiques...

gnants en biologie sont les moins préoccupés. Les opinions des enseignants en économie, en langues vivantes et en histoire-géographie sont significativement différentes de celles des enseignants en biologie, productions animales et aménagement sur la production de chou par fusion cellulaire. Les opinions des enseignants en économie et en langues vivantes sont significativement différentes de celles des enseignants en biologie, en productions animales et en aménagement sur la production de tomates transgéniques. Les opinions des enseignants en aménagement, en économie et en histoire-géographie sont significativement très différentes de celles des enseignants en biologie et en productions animales sur la production de chymosine par génie génétique.

Graphe 3. Pourcentages d'enseignants des différentes disciplines qui pensent que les diverses applications pourront altérer la santé humaine

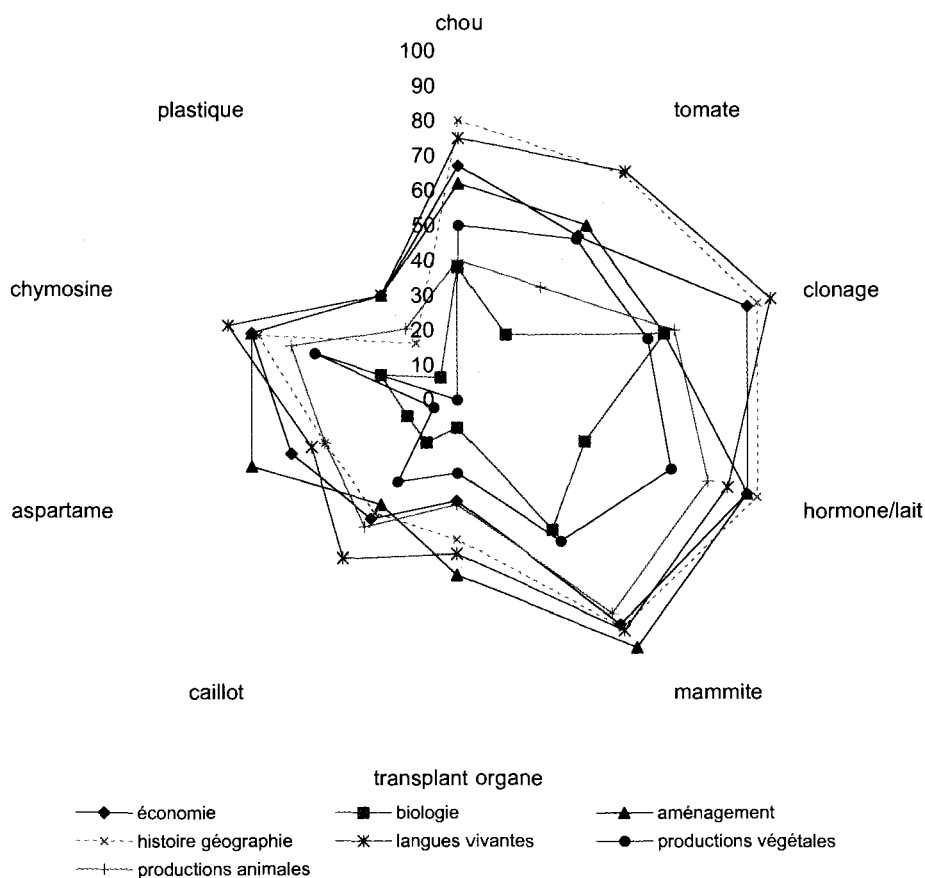


... les risques
pour la santé...

Les opinions des différentes catégories d'enseignants sur les répercussions des applications biotechnologiques sur la dégradation de la santé humaine sont très éclatées (graphe 3). On retrouve la dichotomie enseignants en sciences humaines/enseignants en sciences et techniques. Les premiers sont les plus inquiets sur les conséquences des applications en agriculture, en élevage, en médecine vétérinaire et en agroalimentaire. Une fois de plus, les enseignants en aménagement se distinguent. Ils craignent plus que les autres les répercussions des applications en médecine humaine sur la dégradation de la santé humaine. Les opinions des enseignants en économie et en langues vivantes sont significativement différentes de celles des enseignants en productions végétales sur la production de chou par fusion cellulaire. Les opinions des enseignants en langues vivantes et en histoire-géographie sont significativement différentes de celles des enseignants en productions animales et végétales sur la fabrication de tomates transgéniques. Les opinions des enseignants en histoire-géographie et en langues vivantes sont significativement différentes de celles des enseignants en productions végétales sur la fabrication de chymosine. Les opinions des enseignants en aménagement et en langues vivantes sont significativement très différentes de celles des enseignants en biologie et en productions végétales sur la fabrication d'aspartame.

Les enseignants en sciences humaines et en aménagement se déclarent plus inquiets que les enseignants en biologie et en productions végétales. Les enseignants en productions animales expriment une émotion intermédiaire (graphe 4).

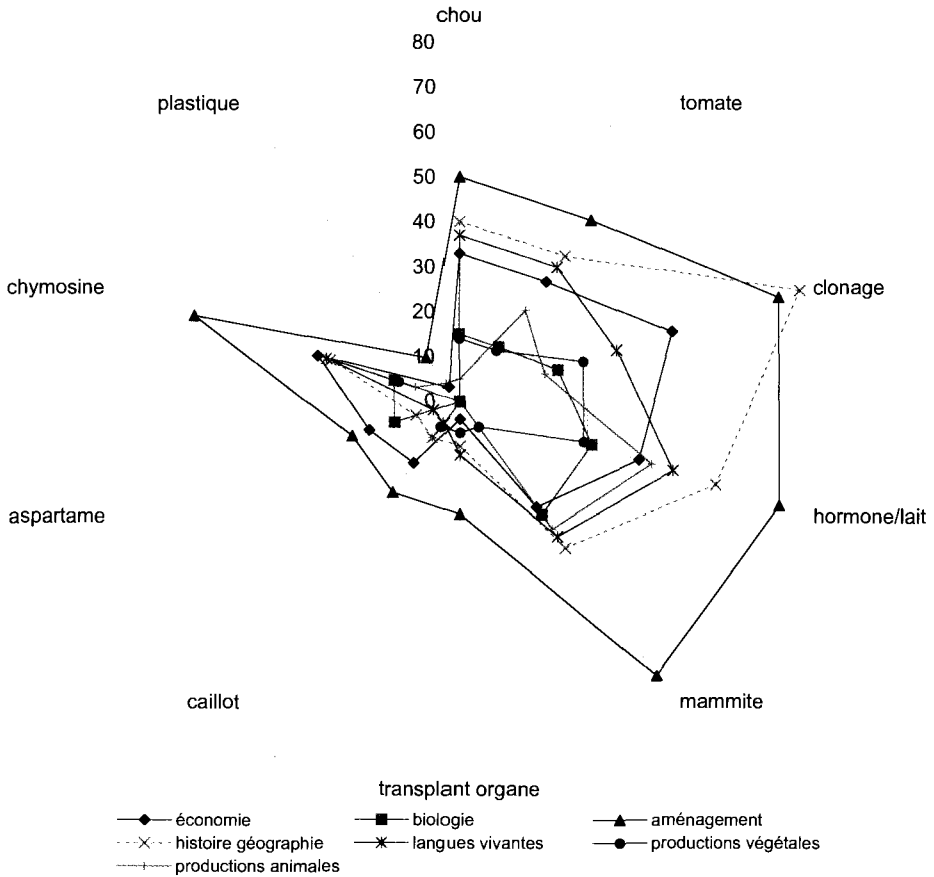
Graphe 4. Pourcentages d'enseignants des différentes disciplines inquiets vis-à-vis des diverses applications



... et les
mouvements
de protestation

Ce sont encore surtout les enseignants en sciences humaines qui se déclarent prêts à s'engager dans des mouvements de protestation, notamment contre les applications en élevage, en médecine vétérinaire et contre la production de chymosine par génie génétique. Les enseignants en aménagement se distinguent à nouveau ; ils sont les plus décidés à s'engager. Les opinions des enseignants en histoire-géographie, en aménagement et en économie sont significativement différentes de celles des enseignants en productions animales et végétales sur le clonage (graphe 5).

Graphe 5. Pourcentages d'enseignants des différentes disciplines se déclarant prêts à s'engager dans des mouvements de protestation contre les diverses applications



CONCLUSION

Les attitudes, clés de voûte des représentations sociales, servent de filtres aux individus pour évaluer tout ce qui est nouveau pour eux. Elles les conduisent à sélectionner et utiliser certaines informations ; elles déterminent en partie leur comportement, leurs actions. Les attitudes seraient fondées sur des arguments cognitifs et des émotions, qu'ils soient positifs ou négatifs. Et certaines attitudes seraient plus déterminées par des arguments, et d'autres par des émotions. De là, on peut se dire qu'un individu maîtrisant peu de connaissances sur un sujet sera plus influencé par ses émotions. Pourtant, dans plusieurs études, nous avons

les différences d'attitude constatées, plutôt qu'aux connaissances...

montré que l'acquisition de connaissances ne modifiait pas les opinions des individus sur les biotechnologies (Simonneaux & Jacobi, 1997 ; Simonneaux, 1998b). Les opinions préexistaient, car les individus se sentent concernés par des savoirs qui peuvent modifier profondément le vivant (les biotechnologies bousculent les repères fondamentaux de vie et de mort, d'identité et d'altérité...); mais elles n'étaient pas ébranlées par l'appropriation de connaissances. Les clés de voûte des représentations sociales sont difficilement ébranlables.

Les différences observées entre les opinions des enseignants de diverses disciplines (qui n'excluent pas des variations interindividuelles dans une même option disciplinaire) (5) nous suggèrent des commentaires. Les enseignants en sciences humaines et en aménagement semblent réaliser une approche globale élargie des questions biotechnologiques. Peut-être prennent-ils en compte davantage de domaines (éthique, économique, écologique, juridique, politique...) et d'autres catégories d'acteurs ?

La notion d'environnement ne s'inscrit peut-être pas dans les mêmes champs pour les enseignants. L'environnement pour les enseignants en biologie et en techniques agricoles est essentiellement biophysique, tandis que pour les enseignants en sciences humaines et en aménagement, il concerne en plus la société dans son ensemble. Ainsi, ce sont les enseignants en langues vivantes et en histoire-géographie qui sont les plus inquiets sur le plan éthique; peut-être prennent-ils davantage en considération des dérives éthiques qui ont marqué l'histoire ? Les enseignants en aménagement, langues vivantes et économie sont les plus inquiets sur les problèmes environnementaux ; peut-être les premiers et les derniers se sentent-ils, du fait de leur formation, plus concernés par la question de la durabilité des ressources ?

L'identité professionnelle détermine comment un individu se situe dans la société. Sainsaulieu (1996) et Dubar (1991) ont approfondi ces phénomènes de construction d'identité professionnelle. Le Thanh Khoi (1992) définit l'identité culturelle d'une communauté comme étant composée d'une langue commune, d'une conscience historique et d'une classe sociale. Pour lui, elle ne peut s'appliquer qu'à "*des groupes restreints qui ont conservé une grande homogénéité*

...seraient liées
à une conception
plus ou moins
globale de
l'environnement

(5) Restons nuancée dans nos propos – à l'instar d'Ausubel, Beck, Kelly et de nombreux sociologues – nous croyons en l'incidence individuelle dans la détermination des points de vue. Sans pourtant nier l'incidence identitaire. L'identité est le produit d'une dynamique qui regroupe deux processus opposés : un processus d'identification et un processus de différenciation. Nous sommes alors en présence de deux mécanismes antagonistes qui permettent à l'individu d'être à la fois dans le groupe et différent du groupe. Il devient nécessaire d'intégrer "l'autre" dans l'identité puisque "*l'identité se définit par rapport à l'altérité*" (Dubar, 1991). La construction identitaire d'un individu le conduit à la fois à être attiré par ce qui est différent mais, dans le même temps, il doit être rassuré par ce qui est identique.

l'identité
professionnelle
varie selon
les disciplines

sociale et culturelle". Cette définition restrictive peut susciter bien des débats dans la mesure où les notions de classe, de conscience historique, voire de langue peuvent être débattues longuement. Notre analyse montre simplement que les caractéristiques identitaires ne sont pas bâties sur les seuls fondements professionnels (la profession d'enseignant au ministère de l'agriculture). Dubar (1991) évoque un processus identitaire biographique au cours duquel les sphères du travail et de l'emploi se combinent à la sphère de la formation pour constituer des domaines pertinents des identifications sociales des individus. L'entrée en formation dans une "spécialité" disciplinaire constitue, selon lui, un acte significatif de l'identité virtuelle. L'identité professionnelle est fondée sur le champ disciplinaire d'activité qui influe sur la "manière de penser" des individus et notamment sur la culture disciplinaire de leur formation. L'identité, selon Sainsaulieu (1996), *"renvoie ainsi à une sorte de séquence culturelle de l'action, à toute une intériorisation de l'expérience sociale sous forme de modèles devenus inconscients et qui gouvernent les conduites (...) par le biais des représentations qu'elles induisent"*. Les enseignants en agronomie ont plus tendance que les enseignants en sciences humaines à considérer les biotechnologies animales et végétales comme une technologie qui s'inscrit dans une logique productiviste positive, dans la lignée des technologies appréhendées dans leur formation de base.

intérêt de
l'interdisciplinarité
pour
une éducation
citoyenne des
biotechnologies

Cette étude montre l'influence de la culture disciplinaire des enseignants et prêche en faveur d'une approche interdisciplinaire des biotechnologies, déjà justifiée par la nature interdisciplinaire des biotechnologies elles-mêmes. Elles justifient les recherches sur l'interdisciplinarité menées dans le cadre de l'European Initiative for Biotechnology Education (DGXII) qui conduisent à la formalisation d'outils interdisciplinaires et à la mise en place de formations conjointes d'enseignants en sciences humaines et sciences et techniques sur l'éducation aux biotechnologies. En effet, l'enjeu éducatif majeur est de favoriser le questionnement des élèves, de leur faire comprendre la complexité d'une prise de décision sur des questions porteuses de répercussions sociales (économiques, éthiques, écologiques,...), de les former à l'argumentation pour qu'ils puissent participer aux débats sur les biotechnologies.

Dans une perspective d'éducation citoyenne, les enseignants en sciences humaines, plus enclins à débattre des répercussions sociétales, et mieux armés pour animer des débats et former les élèves aux démarches de prise de décision argumentée, peuvent compléter ainsi l'approche à dominante scientifique des enseignants en sciences et techniques.

Laurence SIMONNEAUX
École Nationale de Formation Agronomique,
Toulouse

BIBLIOGRAPHIE

- ASTOLFI, J.-P. (1999). Les représentations : un “concept obligé” au statut épistémologique ambigu. In *Actes du deuxième colloque. Recherche(s) et formation des enseignants* (pp. 27-32). Grenoble : IUFM.
- ATLAN, H. (1999). “La fin du tout génétique?” *Vers de nouveaux paradigmes en biologie*. Paris : Éd. INRA, coll. *Sciences en question*.
- AUSUBEL, D.P. (1968). *Educational Psychology : A Cognitive View*. Holt, New York : Rinehart & Winston.
- BANDURA, A. (1977). The concept of health and the role of health education. *Journal of School Health*, 51, 8, 461-464.
- BECK, A.T. (1976). *Cognitive Therapy and the Emotional Disorders*. New York : International Universities Press.
- BERGER, P. & LUCKMAN, T. (1967). *The Social Construction of Reality*. Harmondsworth : Penguin.
- BUD, R. (1993). *The uses of Life : a History of Biotechnology*. New York : Cambridge University Press.
- DUBAR, C. (1991). *La socialisation. Construction des identités sociales et professionnelles*. Paris : Armand Colin.
- JODELET, D. (1989). *Les représentations sociales*. Paris : PUF.
- LE THANH KHOI (1992). *Culture, créativité et développement*. Paris : L’Harmattan.
- LEWIS, J., LEACH, J., WOOD-ROBINSON, C. & DRIVER, R. (1998). Students’ attitudes to the new genetics : Prenatal screening for cystic fibrosis. In *First Conference of European Researchers in Didaktik of Biology, ERIDOB 96, Kiel* (pp. 173-182).
- MARRIS, C. (1999). OGM : comment analyser les risques? *Biofutur*, 195, 44-47.
- MORIN, E. (1998). Articuler les savoirs. In *Quels savoirs enseigner dans les lycées?* (pp. 3-55). Paris : MEN.
- MOSCOVICI, S. (1961). *La psychanalyse, son image et son public*. Paris : PUF.
- MOSCOVICI, S. (1976). Psychologie des représentations sociales. *Cahiers Vilfredo Pareto*, 14, 409-416.
- SAINSAULIEU, R. (1996). Identités et relations au travail. *Éducation Permanente*, 128, *Identités collectives et changements sociaux*, 187-192.
- SCHUTZ, A. (1962). *The Problem of Social Reality : Collected Papers I*. La Haye : Martinus Nijhoff.
- SIMONNEAUX, L. (1998a). *Le clonage animal*. Dijon : Éducagri éditions.

SIMONNEAUX, L. (1998b). Students' views after the birth of Dolly the sheep. *Second Conference of European Researchers in Didaktik of Biology, ERIDOB 98, Göteborg*. On <http://na-serv.did.gu.se/eridob.html>.

SIMONNEAUX, L. (1999). Les mutations du monde agricole et l'évolution de l'identité des enseignants : la question de l'interdisciplinarité. In *Séminaire interdisciplinarité*. Toulouse : ENFA.

SIMONNEAUX, L. (2000). Influence of cultural and disciplinary identity on the way teachers in agricultural education in France relate to knowledge in biotechnology. *New Genetics and Society*, 19, 1, 23-48.

SIMONNEAUX, L., JACOBI, D. (1997). Language constraints in producing prefiguration posters for a scientific exhibition. *Public Understanding of Science*, 6, 4, 383-408.

SKINNER, B. (1953). *Science and Human Behaviour*. New York : Macmillan.

RUPTURES ET CONTINUITÉS ENTRE PHYSIQUE ET MATHÉMATIQUE À PROPOS DE LA CARACTÉRISTIQUE DES DIPÔLES ÉLECTRIQUES LINÉAIRES

Didier Malafosse
Alain Lerouge

Les professeurs de sciences physiques s'étonnent souvent des difficultés rencontrées par leurs élèves dans la mise en œuvre de connaissances mathématiques. Parallèlement, les enseignants de mathématiques sont convaincus que les notions qu'ils enseignent sont spontanément transférables en physique. En nous appuyant sur un exemple, celui de l'étude expérimentale de la loi d'Ohm, nous montrons que l'analyse de ces difficultés met en évidence une absence de repères pour penser les continuités et les ruptures entre les deux disciplines et nous proposons un modèle articulé autour des notions de "cadre de rationalité" et de "registre sémiotique" qui permet d'analyser les processus de conceptualisation par une approche inter-didactique.

la difficile
communication
des enseignants
de mathématiques
et de physique

Les professeurs de sciences physiques de l'enseignement secondaire manifestent souvent leur étonnement devant l'incompétence des élèves à la mise en œuvre des mathématiques dans leur discipline. Parallèlement, les enseignants de mathématiques sont convaincus que les notions qu'ils enseignent sont spontanément transférables en physique. Par exemple, lorsqu'en classe de physique on demande aux élèves de déterminer l'équation d'une droite ou la valeur d'un coefficient directeur à partir de quelques points de mesure à peu près alignés, l'activité attendue va à l'encontre des règles édictées en mathématique obligeant les élèves à recourir à une démarche algébrique portant sur la droite en tant qu'objet géométrique continu. Il en va de même pour les procédures de validation d'alignement fondée sur l'interprétation graphique en physique et sur une démonstration formelle en mathématique. Nous allons voir que ces difficultés relèvent d'une absence de repères pour penser les continuités et les ruptures entre les deux disciplines, et nous allons tenter d'analyser les raisons de ces difficultés dans le cas particulier de l'étude expérimentale de la loi d'Ohm. En effet, ce thème traditionnel en physique est l'occasion de mettre en œuvre divers modes de représentation et diverses procédures de validation intervenant en mathématique à propos de la proportionnalité.

Dans un premier temps, nous présentons les conceptions d'enseignants des deux disciplines faisant état du fossé qui les sépare à propos des éléments sémiotiques utilisés dans les représentations graphiques. Ensuite, nous proposons un

modèle visant à expliciter ce malaise en terme de rupture de rationalité et d'instabilité des registres de représentation lorsqu'on passe d'une discipline à l'autre. Enfin, le modèle est mis en œuvre dans des situations expérimentales extraites d'un travail de recherche plus général sur cette problématique. Pour ne pas alourdir cette présentation, nous ne développerons pas la méthodologie expérimentale, disponible par ailleurs (Malafosse, 1999).

1. À PROPOS DES REPRÉSENTATIONS GRAPHIQUES ET ALGÈBRIQUES DE LA LOI D'OHM EN PHYSIQUE

1.1. L'introduction de la notion de caractéristique dans l'enseignement de la loi d'Ohm

Depuis près d'un siècle, la loi d'Ohm est inscrite à divers niveaux du programme de sciences physiques de l'enseignement secondaire français. Au moment de son introduction en 1902, sa présentation était très différente de la formulation initiale de G. S. Ohm (Pourprix & Locqueneux, 1988) et elle a fait l'objet de nombreux remaniements liés essentiellement à l'évolution des conceptions des physiciens à propos de l'enseignement des circuits électriques (Johsua, 1994).

Depuis les années 70, la présentation de cette loi dans l'enseignement secondaire s'est relativement stabilisée. Elle repose sur une relation à l'expérimental imprégnée d'inductivisme, qui, comme le rappelle Johsua (1989), "*est à la fois une option épistémologique concernant la physique, et une option pédagogique proprement dite*". En effet, dans un premier temps, on admet implicitement que, pour établir la loi, il suffit de constater à partir d'un nombre fini de données expérimentales, qu'il existe une relation fonctionnelle de type linéaire entre la tension aux bornes de dipôles d'un certain type (appelés aujourd'hui "conducteurs ohmiques") et l'intensité qui le traverse. En somme, il suffit de "lire" la loi "écrite" dans le phénomène. En outre, cet inductivisme épistémologique se double très souvent (Robardet, 1995) d'un inductivisme de nature pédagogique dans la mesure où l'élève est invité à "appliquer" une stratégie élaborée à l'avance par l'enseignant, ce qui le prive à la fois d'un travail d'émission d'hypothèses et de conception d'un dispositif expérimental, mais aussi et surtout d'une réelle activité de modélisation (Robardet & Guillaud, 1997, pp. 49-51). Ainsi, à partir d'un ensemble de points à peu près alignés, on "découvre" la proportionnalité entre la tension et l'intensité relatives au dipôle concerné, dont on détermine la résistance électrique *via* le coefficient de proportionnalité. Cette présentation favorise alors un traitement didactique reposant implicitement sur une "analogie" entre les procédures de traitement de problème de proportion-

l'enseignement
de la loi d'Ohm

la question de la
proportionnalité

nalité en mathématique et en physique, ce que confirme l'examen des manuels scolaires. Or, comme nous le verrons plus loin, le rapprochement des deux disciplines à cette occasion est source de difficultés pour les élèves, et il faut se poser la question du bien fondé de cette "analogie". En outre, cette nécessité est renforcée par le fait que le dernier remaniement du programme de sciences physiques de la classe de Troisième introduit, explicitement pour la première fois au collège, la notion de "caractéristique de dipôles" (1). Cet ajustement conduit à représenter la loi d'Ohm sous forme algébrique par l'expression $U = R \cdot I$ et sous forme graphique par une droite passant par l'origine du plan $\{U, I\}$. L'évolution actuelle des programmes pose la question de l'intérêt de cette double représentation.

1.2. Le point de vue contrasté d'enseignants en mathématique et physique

enquête auprès
d'enseignants
débutants

Pour répondre aux deux questions de la pertinence de l'analogie de traitement des problèmes de proportionnalité en physique et en mathématique, et de l'intérêt de la double représentation graphique/algébrique de cette proportionnalité, nous avons réalisé auprès de professeurs stagiaires (PLC2) en fin d'année de formation professionnelle (2) une phase exploratoire en deux étapes. Dans un premier temps, nous avons procédé à une série d'entretiens semi-directifs auprès d'une dizaine de PLC2 de sciences physiques. Ces entretiens visaient à recueillir leur analyse des difficultés rencontrées par les élèves à l'occasion du travail de modélisation consécutif à l'étude expérimentale de la loi d'Ohm. Ensuite, nous avons organisé un débat entre PLC2 de mathématiques et de sciences physiques pour obtenir leurs représentations à propos des divers éléments graphiques mis en œuvre dans le traitement des représentations cartésiennes.

• Entretiens avec des PLC2 de sciences physiques

Les enseignants que nous avons choisi d'interroger exerçaient en classe de Troisième ou de Seconde et avaient traité la leçon sur la loi d'Ohm qui figurait à l'époque au programme des deux classes. Ils s'étaient tous engagés spontanément

-
- (1) Le programme de sciences physiques de la classe de Troisième [élèves de 14-15 ans] publié au *B.O.E.N. n° 10 du 15.10.98* précise les points à aborder : *Notion de résistance électrique. Unité. Caractéristique d'un dipôle. Loi d'Ohm*. On peut remarquer que depuis la fin des années 70, la représentation graphique de la loi d'Ohm et des caractéristiques des dipôles électriques était repoussée en classe de Seconde, un an après son introduction sous forme algébrique.
- (2) On pourrait raisonnablement émettre une réserve sur la pertinence de recueils de représentations auprès de professeurs stagiaires (et donc fraîchement sortis du système universitaire). Néanmoins, nos expériences professionnelles (notamment en formation continue) nous invitent à penser que ces représentations évoluent peu entre la fin de l'année de formation professionnelle (période à laquelle nous avons opéré avec les PLC2) et la suite de la carrière.

dans une détermination de type graphique (3), et de leur avis unanime, cette étape de modélisation *via* le graphe avait constitué pour les élèves une source de difficultés. Comme attendu, leur interprétation première reposait sur l'incapacité des apprenants à transposer des résultats élémentaires des mathématiques dans le cadre de la physique, et à passer du graphe d'origine expérimentale à l'expression algébrique de la loi.

L'analyse de ces entretiens a révélé :

- la volonté des enseignants de construire une séquence dont l'objectif central repose sur la détermination quantitative de la résistance d'un conducteur ohmique donné plutôt que sur une analyse phénoménologique de l'influence de l'introduction de divers conducteurs dans un circuit ; ce choix qui s'appuie sur une analogie entre des graphes en mathématiques et physique révèle une surdétermination des mathématiques par rapport à la physique conduisant les stagiaires à négliger l'étude phénoménologique aussi bien dans le choix du dispositif expérimental que dans celui de l'exploitation de la loi au profit d'un traitement mathématique complètement décontextualisé ;
- l'ignorance de la part de ces professeurs stagiaires de l'existence de différences entre les règles de traitement du graphique cartésien en physique et en mathématique ;
- l'illusion que pour les élèves, le passage de la représentation cartésienne à la relation algébrique nécessaire à l'établissement de l'expression analytique de la loi d'Ohm était totalement transparent.

Pour mieux cerner ces deux derniers points, nous avons organisé un débat contradictoire entre professeurs stagiaires de sciences physiques et de mathématiques.

**• Débat entre PLC2 de mathématiques
et de sciences physiques**

La rencontre s'est déroulée sous forme de deux débats filmés regroupant chacun 20 professeurs stagiaires de sciences physiques et de mathématiques de l'IUFM de Montpellier. La situation d'entrée dans l'activité consistait en un questionnaire relatif à la représentation cartésienne souvent utilisée par les élèves en fin de Troisième ou au début de Seconde, tant dans le cadre scolaire (4) des mathématiques (représentation des fonctions) que dans celui des sciences physiques (caractéristiques de dipôles, etc.). Ce questionnaire était structuré en trois parties :

surdétermination
de la physique
par les
mathématiques

(3) ... Alors que les programmes ne l'exigeaient pas au niveau de la classe de Troisième.

(4) Nous distinguons les cadre de rationalité d'une part sur des bases épistémologiques (cadre des mathématiques et cadre de la physique) (Lerouge, 1992) et d'autre part sur un niveau de transposition (cadre culturel, scolaire ou personnel) (Malafosse, 1999).

- définitions des objets géométriques qui apparaissent sur un graphique;
- procédures d'obtention et de traitement de ces objets;
- statut de preuve d'un constat graphique.

la droite des
enseignants de
mathématique

Comme prévu, de nombreux antagonismes de conceptions se sont révélés. Ainsi, nous avons pu observer que les professeurs stagiaires de mathématiques sont capables de fournir "plusieurs définitions précises" de la droite ("par une équation cartésienne, par un point et une direction, par deux points, par une relation vectorielle") et du point ("par un ensemble de n coordonnées dans un espace à n dimensions, par l'intersection de deux droites"), définitions qui, entre parenthèses, ne renvoient pas à la définition de l'objet droite au sens d'Euclide, mais à son utilisation dans le cadre culturel de la géométrie analytique.

la droite des
enseignants
de physique

Pour les professeurs stagiaires de sciences physiques, "la droite n'a pas besoin d'être définie" car "elle ne sert qu'à exploiter des points expérimentaux", "pour montrer une relation de linéarité" ou parce qu'elle n'est qu'un "cas idéal" et donc "n'existant pas", "la droite réelle n'étant en fait qu'un segment... dont les limites sont imposées par les contraintes matérielles", et "d'une épaisseur imposée par la précision des mesures". De même, pour eux, le point n'existe pas car seule une "tache représente un état du système affecté de l'incertitude des mesures". Cette position a été résumée par un des stagiaires de sciences physiques en réponse à une remarque d'un stagiaire de mathématiques qui craignait que le concept de droite ne fût confondu avec le trait du graphique par la phrase : "je regrette que mes élèves ne fassent pas des taches assez grosses et des bandes assez larges parce que, expérimentalement, (...), je préférerais qu'ils fassent une tache qui couvre le domaine d'incertitude; là, je ferais de la physique. À partir de là, je passe à la notion de droite virtuelle et de point virtuel et, à partir de là, je change de niveau, je passe aux maths."

Les professeurs stagiaires des deux communautés ont ainsi eu la surprise de découvrir que leurs approches épistémologiques et didactiques étaient très différentes. En classe de mathématiques, on pense d'abord la droite puis on la visualise et par déduction, on s'intéresse à ses points, alors qu'en sciences physiques, "on part d'un nuage de points pour modéliser" par induction. Nous avons aussi constaté que les stagiaires des deux disciplines ont du mal à se comprendre lorsqu'on aborde le problème du statut de la droite qui "existe sans être représentée" pour les mathématiciens, alors qu'"elle n'est qu'un outil de travail" sans existence propre pour les physiciens. Cette incompréhension se traduit par le refus des mathématiciens et l'acceptation des physiciens de la proposition : "on trace une droite". Enfin, alors que les professeurs stagiaires de mathématiques fondent leurs conceptions de la droite et du point sur des

structures géométriques isomorphes à celles de l'ensemble des réels, restant ainsi dans le cadre culturel des mathématiques formelles, les professeurs stagiaires de sciences physiques perçoivent la droite et le point comme des objets idéalisés obtenus à partir de bandes et de taches par passage du cadre culturel de la physique à celui des mathématiques, ces bandes et ces taches étant les projections dans le cadre physique d'états d'un système réel, c'est-à-dire d'un ensemble d'objets et d'événements.

1.3. Nécessité d'une approche inter-didactique

une recherche
de clarification

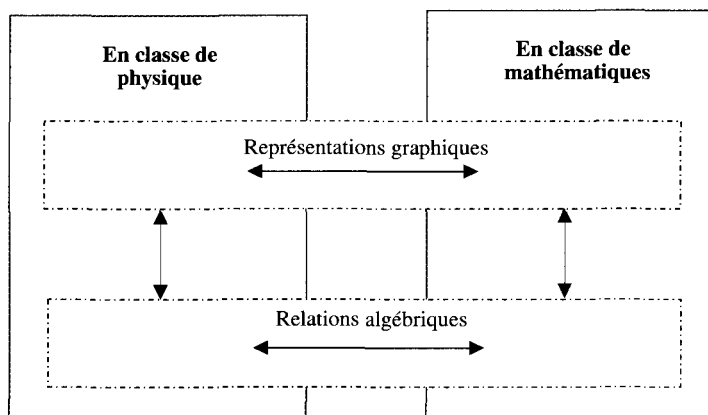
En première analyse, ces débats ont permis de faire un inventaire des différences de conceptions des membres des deux communautés de stagiaires à propos des éléments sémiotiques intervenant dans les graphiques et à propos de leur utilisation en classe. Mais cette phase exploratoire a surtout révélé les difficultés à intégrer ces résultats dans un cadre théorique. Par exemple, dans quel modèle nous placer pour distinguer le graphique du professeur de mathématiques et celui du professeur de sciences physiques qui semblent différer par la signification de leurs éléments sémiotiques mais aussi par leurs règles de traitement ? Quels "outils" mettre en œuvre pour comparer les passages entre le graphique et la relation algébrique que réalise l'élève en cours de mathématiques et ces passages (qui ne sont plus exactement les mêmes) lorsque cet élève se retrouve en séance de travaux pratiques de physique ? Bref, dans quel cadre théorique nous placer pour révéler à la fois l'illusion de transparence interdisciplinaire de l'usage des graphiques et des formules algébriques, et les difficultés à coordonner dans une discipline donnée des représentations différentes d'un même contenu sémantique ?

Pour répondre à cette interrogation de nature théorique, nous avons cherché à construire un modèle permettant d'opérationnaliser dans une démarche de recherche inter-didactique l'approche globale que synthétise le schéma ci-dessous [cf. figure 1].

2. PROPOSITION D'UN MODÈLE D'ANALYSE DES PROCESSUS DE CONCEPTUALISATION EN INTER-DIDACTIQUE DES MATHÉMATIQUES ET DE LA PHYSIQUE

Pour ce modèle présenté initialement avec J.-M. Dusseau (Malafosse, Lerouge & Dusseau, 2000), nous avons choisi de recourir aux notions de registre sémiotique (Duval, 1993) et de cadre de rationalité (Lerouge, 1992) qui ont déjà été mises en œuvre en didactique des mathématiques, notamment à propos de la croissance linéaire (Duval, 1988b).

Figure 1. Problèmes de transparence et de coordination des représentations d'un même contenu sémantique interdisciplinaire



2.1. Registre sémiotique

Pour Duval la distinction entre un objet et sa représentation sémiotique est *“un point stratégique pour la compréhension des mathématiques”* (1993, p. 37) car l'objet mathématique sur lequel s'appuie le processus de conceptualisation n'a pas de réalité matérielle. Cet auteur pose en corollaire la nécessité de développer une approche sémiotique de la construction des connaissances en mathématiques qui l'amène à définir la notion de registre sémiotique comme un système de signes doté des trois *“fonctions cognitives fondamentales”* (Duval, 1995, p. 200) : la *“fonction de communication”*, la *“fonction de traitement”* (c'est-à-dire la transformation de la représentation sans changer de système sémiotique), et la *“fonction d'objectivation”* (permettant à la fois la prise de conscience de l'existence de la représentation en tant que telle, et sa conversion dans un autre système sémiotique). De ce point de vue, les activités mathématiques nécessitent le recours à divers registres (la langue naturelle, l'écriture symbolique, le graphique cartésien, les figures géométriques, les tableaux de données, etc.) et leur mise en œuvre coordonnée permet de réaliser les traitements cognitifs de la manière la plus économique possible. Mais Duval justifie cette nécessité de coordination par une autre raison beaucoup plus fondamentale liée à la construction des connaissances. En effet, pour lui, *“la compréhension (intégrative) d'un contenu conceptuel repose sur la coordination d'au moins deux registres de représentation, et cette coordination se manifeste par la rapidité et la spontanéité de l'activité de conversion [... mais] cette coordination est loin d'être naturelle”* (Duval, 1993, p. 51). Duval insiste alors sur l'importance de la

la notion
de registre en
didactique des
mathématiques

extension en
didactique de
la physique

mise en congruence sémantique d'unités significatives entre divers registres pour permettre l'activité de conversion. Par exemple, le fait de mettre en correspondance le signe du coefficient directeur d'une droite dans le registre de l'écriture formelle des fonctions et l'inclinaison de cette droite dans le registre graphique établit une congruence entre les deux registres qui facilitera dans d'autres situations le passage automatique de l'un à l'autre, mais surtout l'appropriation du concept de croissance. Sans ces correspondances, il y a un cloisonnement des registres chez les élèves *"qui ne reconnaissent pas le même objet à travers des représentations qui en sont données dans des systèmes sémiotiques différents : l'écriture algébrique d'une relation et sa représentation graphique"* (Duval, 1993, p. 52). Les notions de registre sémiotique et de congruence sémantique ayant été définies et mises en œuvre par cet auteur en didactique des mathématiques, la question se posait de la possibilité de leur transposition en didactique de la physique. Nos travaux (Malafosse, 1999) reposant sur une approche épistémologique de la nature des *"objets conceptuels"* (Bunge, 1983) en mathématiques et en physique ont permis de montrer l'aptitude de ces notions à opérer aussi en didactique de la physique. Nous considérons que les activités cognitives de la physique nécessitent également la mise en œuvre coordonnée de divers registres (la langue naturelle, l'écriture symbolique, le graphique cartésien, les figures géométriques, les tableaux de données, etc.), mais la question se pose de savoir si les registres sémiotiques identifiés dans les deux disciplines sont les mêmes. Autrement dit, comment déterminer dans quelle mesure la nature des disciplines influe sur les règles de construction des représentations sémiotiques ? Pour tenter de répondre à cette question, nous avons retenu la notion de cadre de rationalité qui ouvre la sémantique d'un registre au contexte général de la rationalité disciplinaire dans lequel il est utilisé.

2.2. Cadre de rationalité

la notion
de cadre de
rationalité en
didactique des
mathématiques

La notion de cadre de rationalité (Lerouge, 1992) a été proposée initialement pour analyser le statut de la droite au collège, en termes de rupture de rationalité entre le familier des élèves et le culturel mathématique qui leur est enseigné. A. Lerouge considère que les processus de conceptualisation en mathématiques sont gérés à un instant donné par deux cadres de rationalité inter-réagissant : le cadre familier de l'élève, et le cadre culturel des mathématiques (5). Dans le cas particulier de l'analyse des processus de conceptualisa-

(5) Ou plus exactement le cadre scolaire des mathématiques, c'est-à-dire le transposé au niveau scolaire considéré du cadre culturel des mathématiques savantes. Pour alléger la lecture nous nous contenterons de le désigner par l'expression "cadre des mathématiques", et de même pour le cadre de la physique.

tion de la droite au collège, le cadre de rationalité familial se trouve fondamentalement en rupture avec celui des mathématiques. En particulier, si le registre des figures géométriques intervient dans les deux cadres, il ne renvoie pas du tout aux mêmes signifiés. Dans le premier cadre, la droite est identifiée au trait droit dessiné avec la règle, alors que dans le second, il s'agit d'un objet idéal inconnu que le trait droit sert à conceptualiser. Dans un article à paraître, Lerouge (2000) insiste tout particulièrement sur le fait que la différenciation des deux cadres ne se limite pas aux seuls registres sémiotiques mais doit être analysée au niveau de quatre ruptures :

- une rupture d'objet entre la droite matérielle et la droite idéale ;
- une rupture des processus de conceptualisation entre la conceptualisation spontanée et la conceptualisation scientifique [au sens de Vygotski (1934)] ;
- une rupture de processus de validation entre le constat figural et la démonstration ;
- une continuité de registre sémiotique au niveau des signifiants, mais une rupture au niveau des signifiés.

Cette analyse en termes de continuités et de ruptures de rationalité entre le cadre familial et le cadre des mathématiques peut être étendue au cas de l'interdisciplinarité, à la condition de distinguer un cadre de rationalité de la physique et un cadre de rationalité des mathématiques. On peut alors définir la notion de cadre de rationalité comme un ensemble cohérent de fonctionnement de la pensée culturelle ou familiale, caractérisé par quatre composantes :

- l'ensemble des "*objets conceptuels*" (Bunge, 1983) sur lequel porte la conceptualisation ;
- le type de processus de validation ;
- les éléments de rationalité (règles de traitement et de validation) ;
- et enfin, les registres sémiotiques qui servent de support à la conceptualisation et à la communication.

C'est ce qu'illustre le tableau ci-dessous [cf. tableau 1] qui caractérise les cadres de rationalité mathématique, physique, et familial, à partir des objets conceptuels sur lesquels portent l'activité cognitive des sujets, et des règles de traitement et de validation mises en jeu dans cette activité.

Le fait qu'interviennent, aussi dans l'identification des cadres de rationalité, les registres sémiotiques qui servent de support à la conceptualisation et à la communication impose de coordonner ces deux notions. C'est ce que nous allons tenter de faire en interprétant, dans un premier temps, le discours des professeurs stagiaires que nous avons interviewés au cours de la phase exploratoire de nos travaux. Ceci nous amènera à formuler des hypothèses à propos de la stabilité de la notion de registre sémiotique dans l'opération de changement de cadre de rationalité, et à

propos de la spontanéité de la coordination de plusieurs registres dans un cadre de rationalité donné. Enfin, nous mettrons à l'épreuve ces hypothèses dans l'analyse de productions d'élèves de classe de Troisième, à l'occasion de l'étude expérimentale de la loi d'Ohm.

Tableau 1. Exemples (6) d'objets conceptuels et d'éléments de rationalité

| | Cadre de rationalité des mathématiques | Cadre de rationalité familial | Cadre de rationalité de la physique |
|--------------------------------|--|--|--|
| Objets conceptuels | La droite, la croissance, la continuité, l'additivité, la dérivée, le point, etc. | Le chaud et le froid, la lumière, les fées, la peur, le point, etc. | L'énergie, la vitesse, la résistance électrique, l'électron, le point, etc. |
| Éléments de rationalité | La déduction logique, le raisonnement par récurrence, l'analyse combinatoire, l'infini, etc. | La validation par constat (fréquence de répétition, mesurage sur dessin), la ressemblance, la déduction, etc.) | L'homogénéité des formules, la réfutabilité, la validation par induction, la déduction logique, etc. |

3. MISE EN ŒUVRE COORDONNÉE DES NOTIONS DE REGISTRE SÉMIOTIQUE ET DE CADRE DE RATIONALITÉ

3.1. Interprétation du discours des professeurs stagiaires (PLC2)

Pour les PLC2 de physique interviewés à l'occasion de la phase exploratoire, le travail de modélisation conduisant à la loi d'Ohm consiste d'une part en une identification suite à un constat de ressemblance du graphe expérimental construit à partir des mesures physiques et du graphe associé à l'étude de la fonction linéaire, et d'autre part en une identification des relations fonctionnelles $y = a \cdot x$ et $U = R \cdot I$ [cf. figure 2]. Le changement de cadre de rationalité réalisé à cette occasion dans les registres graphique et algébrique est supposé

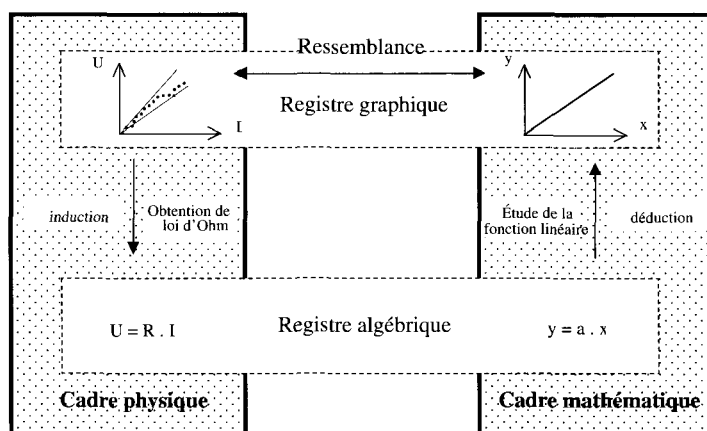
couplage des notions de registre sémiotique et de cadre de rationalité

- (6) Comme on peut le constater sur ces exemples, certains objets conceptuels (comme par exemple le point) apparaissent dans plusieurs cadres de rationalité, mais les recueils de conception que nous avons réalisés tant au niveau des élèves (Lerouge, 1992) qu'à celui des PLC2 (Malafosse, 1999) montrent que leur statut varie beaucoup d'un cadre à l'autre. Par contre, certains objets conceptuels (comme par exemple l'électron) n'existent que dans un cadre de rationalité particulier. Il en est de même des éléments de rationalité qui peuvent être spécifiques ou non d'un cadre de rationalité donné.

contextualisation
disciplinaire
du registre
sémiotique

totalemment transparent. Or, d'une part, de sérieuses difficultés d'élèves sont constatées, et d'autre part, l'analyse des débats contradictoires entre professeurs stagiaires de mathématiques et de sciences physiques a révélé de très grands écarts entre leurs conceptions à propos des éléments significatifs des registres graphiques employés dans les deux disciplines. Tout ceci nous ramène à la question de savoir si, par exemple, le registre du graphique cartésien mis en œuvre en mathématiques peut être identifié à celui employé en physique. Par ailleurs, les professeurs stagiaires de sciences physiques n'interprètent jamais, en termes de difficultés de coordination de registres sémiotiques, l'échec des élèves dans les activités nécessaires pour exprimer la loi d'Ohm. Ils préfèrent, au mieux, argumenter en termes de déductif/inductif pour opposer les activités demandées en mathématiques et en physique.

Figure 2. Couplage entre les notions de cadre de rationalité et de registre sémiotique



3.2. Hypothèse de l'instabilité de la notion de registre sémiotique dans l'opération de changement de cadre de rationalité

le registre
graphique
cartésien en
mathématique
et en physique

Pour répondre à la question de l'instabilité de la structure de registre au cours des opérations de changement de cadre de rationalité, nous avons mené (Malaufosse, 2000) une étude comparative entre le registre graphique cartésien tel qu'il est employé en cours de mathématiques pour l'étude des fonctions linéaires et en cours de physique pour l'étude expérimentale de la loi d'Ohm. Cette étude révèle un certain nombre de ruptures tant au niveau des signifiants attachés aux registres sémiotiques qu'à celui des règles de traitement qu'ils permettent de développer [cf. tableau 2].

Tableau 2. Comparaison d'éléments figuratifs des registres graphiques en mathématiques et en physique

| | En physique | En mathématiques |
|-----------------------------------|---|---|
| Le point graphique | Tout point graphique du plan représente un état accessible au système étudié, mais à tout couple de mesures (U, I) on associe une surface (tache). Le point P (U, I) est donc l'idéalisation d'une tache de mesure. | À tout couple de nombres (x, y) on associe par bijection un point graphique M (x, y) du plan XOY de coordonnées x et y. Ce point a les propriétés géométriques d'un point géométrique. |
| Les axes graphiques | Ils ont les propriétés géométriques des droites orientées mais ils sont dimensionnés (par exemple, l'axe des abscisses a pour dimension une intensité et l'axe des ordonnées est un axe de tension). | Ils ont aussi les propriétés géométriques des droites orientées mais ils ne sont pas dimensionnés. |
| Changement d'unités | La forme et l'aire de chaque tache dépendent des conventions de mesure et de représentation (vecteurs unitaires dont la longueur dépend du choix des unités de mesure, convention de branchement des appareils de mesure). | Le point reste un point par changement d'unité des axes de coordonnées. |
| Le passage des points à la droite | Par induction, on passe par interpolation et extrapolation d'un ensemble discontinu de taches à une bande. La propriété de continuité est occultée par celle d'imprécision des mesures. La bande est de longueur et d'épaisseur finies. | La droite graphique est l'ensemble des points graphiques. Elle a les propriétés de la droite géométrique (longueur infinie, épaisseur nulle, etc.). <i>"Le tracé de la droite se génère dans un mouvement et la propriété de continuité relève de cette représentation dynamique."</i> (Duval, 1988a, p. 14) |

| | En physique | En mathématiques |
|--|--|--|
| Idéalisation des procédures expérimentales | Les passages de la tâche au point graphique et de la bande à la droite graphique (qui correspondent à la première étape de la démarche de modélisation) se font dans la perspective d'une idéalisation des procédures expérimentales et par interpolation / extrapolation de nature inductive des résultats expérimentaux idéalisés. | Pas d'équivalent en mathématiques. |
| Passage du registre graphique au registre algébrique | La deuxième étape de la démarche de modélisation consiste à changer de registre mais, tant qu'elle n'est pas tracée, la droite graphique n'est pas convertible dans le registre algébrique sous la forme d'une relation fonctionnelle. C'est par construction de la droite qu'on crée le signifié. | La représentation droite graphique et sa conversion dans le registre graphique sous forme d'une relation fonctionnelle coexistent toujours. Le signifié correspondant existe par définition. |

rupture
au niveau
des signifiants
et des règles
de traitement

Il apparaît sur ce tableau que le changement de cadre de rationalité entraîne au niveau du registre graphique une double rupture : au niveau des signifiants et au niveau des règles de combinaison de ces signifiants. Ce constat est en contradiction avec la caractérisation d'un registre sémiotique graphique unique pour les deux disciplines : en effet, au sens de Duval un registre est caractérisé par "les règles de formation permettant de combiner les signes en l'unité d'une représentation" (Duval, 1995). Il faut donc admettre soit l'existence de deux registres séparés au sens de R. Duval, soit l'existence d'un registre transversal, qui est fortement contextualisé par le changement de cadre de rationalité.

L'exemple suivant implique encore le registre graphique du cadre de rationalité de la physique et illustre l'influence d'un des éléments de rationalité spécifique du cadre de la physique, à savoir sa nécessaire conformité à la réalité des phénomènes réels observés.

Soit le circuit série représenté sur la figure 3, dans lequel on mesure l'intensité et les tensions aux bornes des divers dipôles (deux résistors et le générateur).

La figure 4 représente les courbes caractéristiques tension/intensité de deux dipôles résistifs et du générateur de

tension, ainsi que la courbe obtenue par construction point par point des caractéristiques des deux résistors.

Figure 3. Circuit série à deux résistances

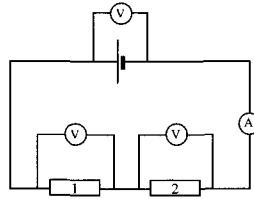
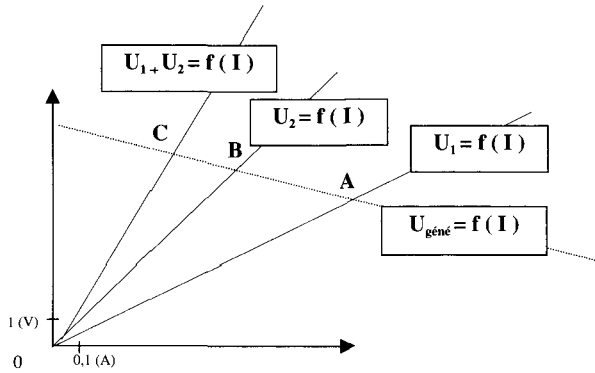


Figure 4. "Combinaison" de caractéristiques

rupture
au niveau
de la référence
phénoménologique



Si l'on pose que dans le cadre de rationalité de la physique tout point graphique doit représenter un état accessible du système, alors il faut admettre que les points d'intersection A, B et C ne peuvent coexister sur le même graphique. En effet, le point géométrique C qui se trouve à l'intersection de la droite graphique $U_{géné} = f(I)$ et de la droite graphique $U_1 + U_2 = f(I)$ correspond au circuit électrique de la figure 3 dans lequel la tension aux bornes du générateur est bien égale à la somme des tensions des deux dipôles pour une intensité particulière. C'est ce que les physiciens appellent un point de fonctionnement de circuit. Les valeurs correspondant à ce point sont celles que l'on mesure effectivement. Par contre, les droites $U_1 = f(I)$ et $U_2 = f(I)$ ne peuvent être considérées comme sécantes de la droite $U_{géné} = f(I)$ qu'à la condition que leur intersection représente un état accessible du système, ce qui n'est pas le cas. Les points géométriques A et B ne peuvent être considérés comme des points graphiques du cadre de rationalité de la physique car il est impossible d'avoir simultanément pour le circuit considéré des couples de mesures de tension et d'intensité correspondant aux coordonnées de ces points. Par contre, la suppression du dipôle D_2 (respectivement D_1) rendrait toute sa valeur heuristique

au graphique, en donnant au point d'intersection A (respectivement B) un sens, celui de point de fonctionnement du circuit électrique associant uniquement le générateur et le résistor D_1 (respectivement D_2). Cet exemple illustre le fait que, dans le registre graphique du cadre de la physique, un point géométrique appartenant à deux droites ne représente pas toujours un point graphique d'intersection de ces deux droites : en physique, seule l'analyse phénoménologique permet d'affecter à un point géométrique une valeur graphique signifiante.

En généralisant ce que nous avons montré pour les registres graphiques cartésiens utilisés en mathématique et en physique, on peut raisonnablement faire l'hypothèse que les registres mis en œuvre dans les deux disciplines diffèrent à la fois par la nature de leurs signifiants, par les règles de combinaisons qui les régissent et par les règles de rationalité de chaque discipline. Nous avons pu tester cette hypothèse auprès des élèves à l'occasion d'une expérimentation sur la conceptualisation de la loi d'Ohm (Malafosse, 1999). Cette expérimentation s'est déroulée en deux étapes : d'abord la mise en œuvre d'une séquence de type "*ingénierie didactique*" (Artigue, 1988) auprès d'une classe de Troisième classée en Z.E.P. (7), et ensuite une enquête sur plusieurs classes de Troisième et de Seconde pour tester la généralité des résultats de l'ingénierie didactique. Cela nous a permis d'analyser les effets au niveau des élèves de la problématique dont nous venons de faire état au niveau des enseignants.

une
expérimentation
en classe

4. ANALYSE DE DIFFICULTÉS D'ÉLÈVES

Nous nous limiterons dans cet article à présenter deux obstacles à l'origine de ces difficultés. Le premier est d'ordre général : il s'agit de l'incapacité des élèves à coordonner spontanément des registres sémiotiques différents. Le second est particulier à la proportionnalité : les divers registres de représentation sont utilisés de manière non congruente par les élèves, aussi bien dans le cadre de rationalité des mathématiques que dans celui de la physique.

4.1. Exemple du travail mono-registre dans le cadre de la physique

Dans le cadre de la séquence d'ingénierie didactique, nous avons proposé aux élèves des activités nécessitant de procéder

(7) Zone d'Éducation Prioritaire : zone géographique dont la population socialement défavorisée nécessite et bénéficie de moyens pédagogiques supplémentaires. Nous avons travaillé dans une classe de ZEP pour bénéficier de "l'effet loupe" apporté par des élèves en difficulté.

travail
monoregistre

à des conversions inter-registres (passage de tableau de mesures à l'expression analytique de lois physiques, passage d'expression analytique de loi à leur représentation sous forme de graphique cartésien, passage de ces graphiques à des tableaux de mesures, etc.). Nous avons pu constater que dans toutes ces activités de traitement de quantités physiques, les élèves restaient dans un travail mono-registre. Par exemple, nous avons invité les élèves à mettre en relation la représentation graphique suivante [cf. graphique 1] et le tableau de mesures correspondant [cf. tableau 3], qu'il s'agissait de compléter en utilisant le graphique.

Graphique 1. Caractéristique tension/intensité d'un dipôle inconnu

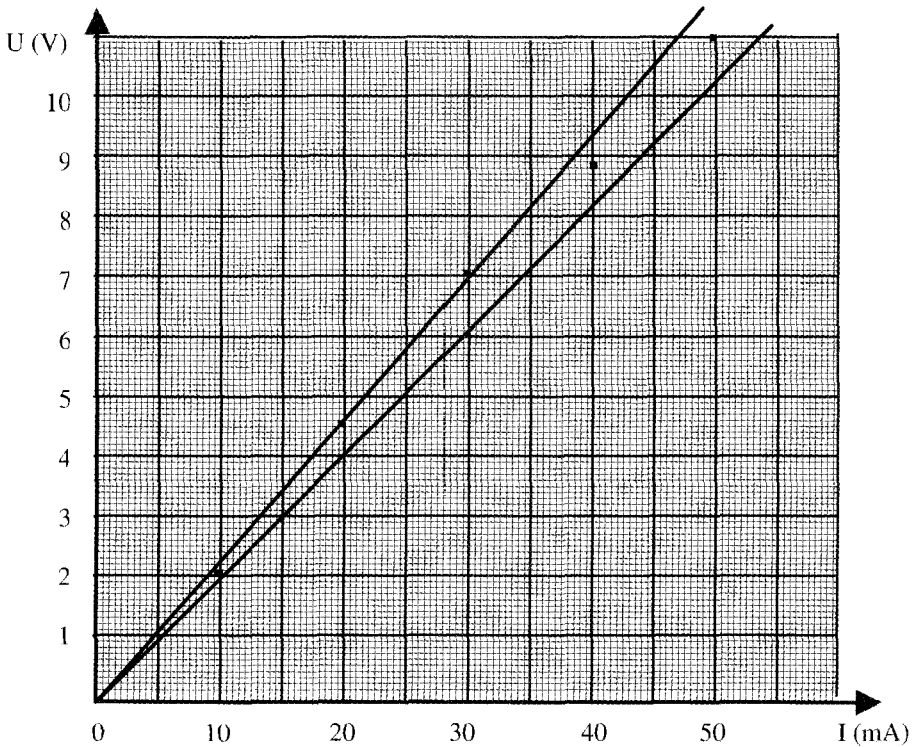


Tableau 3. Tableau de mesures de tension et d'intensité d'un dipôle inconnu

| | | | | | | |
|---------|-----|--------|-------|--------|-----|--------|
| U_R | | 2,05 V | | 6,45 | 8 V | |
| I | 0 A | 10 mA | 20 mA | 0,03 A | | 0,05 A |
| U_R/I | ? | 205 W | 210 W | 215 W | | |

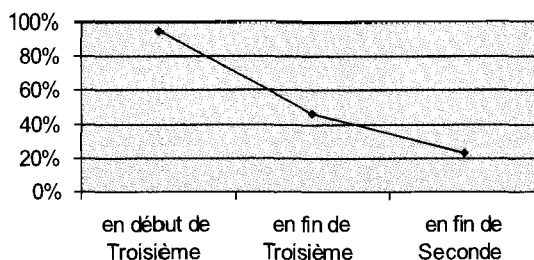
La consigne était la suivante :

À partir des points du graphique ci-joint, complète le tableau de mesures partiellement effacé qui a permis de construire ce graphique.

prégnance des
mathématiques

Malgré l'injonction d'un recours au graphique, nous avons constaté que la quasi-totalité des élèves de la classe d'expérimentation préféraient rechercher des régularités numériques dans les lignes du tableau, quitte à constater des contradictions manifestes. Conformément aux observations de Duval (1993) dans le cadre des mathématiques, la coordination de différents registres du cadre de la physique présente pour les élèves un obstacle majeur qu'ils cherchent à éviter en préférant toutes sortes de stratégies de type mono-registre. L'enquête menée à la suite de l'ingénierie didactique auprès de 165 élèves a confirmé cette tendance en classe de Troisième avec une évolution favorable en classe de Seconde [cf. graphique 2].

Graphique 2. Évolution du comportement mono-registre : pourcentage d'élèves qui refusent de quitter le registre du tableau

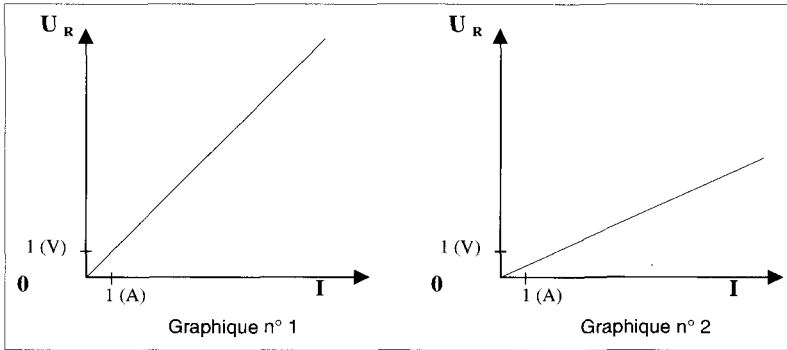


On peut dès lors s'interroger sur la pertinence de la modification du programme de physique de Troisième, s'il n'est pas accompagné de recommandations préconisant un travail spécifique de lecture globale du registre graphique et de réflexion sur les conversions inter-registres.

4.2. Exemple de non-congruence sémantique dans le cadre de la physique

Nous avons aussi cherché à tester d'éventuels défauts de congruence pouvant exister entre les représentations graphiques, analytiques et numériques à propos de la proportionnalité dans le contexte de l'apprentissage de la loi d'Ohm. Pour cela nous avons proposé aux élèves plusieurs activités permettant de déduire des relations dans un registre donné à partir d'observations dans un autre registre. En particulier, nous leur avons proposé les graphiques suivants [cf. figure 5] :

Figure 5. Comparaison graphique de deux résistances



La consigne était la suivante :

En comparant les graphiques n° 1 et n° 2 obtenus pour deux résistors, compare qualitativement (c'est-à-dire sans le moindre calcul) leurs résistances R_1 et R_2 , en expliquant bien ton raisonnement.

Il s'avère que, pour la grande majorité de l'effectif, seul le dipôle n° 1 est un résistor, cette affirmation étant justifiée par une référence fréquente (plus de la moitié des élèves) à la bissectrice de l'angle formé par les axes de coordonnées. Voici deux exemples typiques d'argumentations :

force des
équilibres
perceptifs

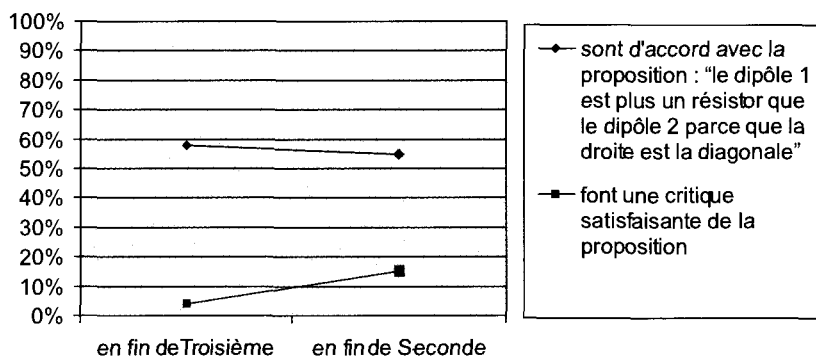
– Dans le premier graphique, il y a proportionnalité car la droite est la diagonale des deux axes alors que ce n'est pas le cas pour le deuxième graphique.

– À mon avis, le n° 1 est plus un résistor que le n° 2 parce que sa courbe coupera le carré à 45° , tandis que pour le n° 2, il doit le couper à environ 30° .

Ce type d'argument a été rencontré par Duval (1988b) à l'occasion du passage du graphique à l'équation correspondante en mathématique. Il est caractéristique d'une absence de congruence entre des représentations graphique et analytique (de la proportionnalité en l'occurrence). Pour Duval, la référence explicite à la "diagonale" montre que "le concept de pente, algébriquement traduit par le coefficient, recouvre deux unités significatives différentes, l'une définie par rapport au signe et l'autre par rapport à l'entier 1. Et ces deux unités significatives correspondent à deux variables différentes, respectivement le sens de l'inclinaison et l'angle. Il n'y a pas congruence entre la direction de la droite dans le plan repéré et le coefficient qui détermine cette direction dans l'écriture algébrique." (Duval, 1988b, p. 240)

L'enquête menée à la suite de l'ingénierie didactique a confirmé cette tendance en fin de classe de Troisième et une évolution peu favorable en classe de Seconde [cf. graphique 3].

Graphique 3. Évolution de non-congruence



Ces résultats questionnent fortement la transparence supposée des registres sémiotiques graphiques et algébriques dans l'approche actuelle de la notion de résistance électrique en classe de Troisième.

CONCLUSION

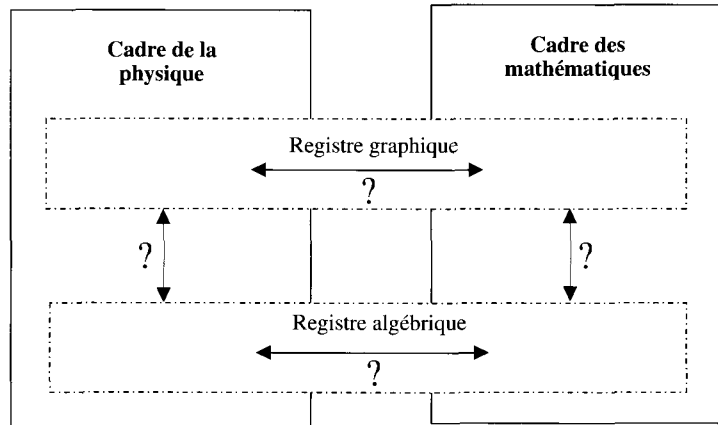
Le modèle d'analyse des processus de conceptualisation que nous proposons permet d'aborder en termes de changements de cadres de rationalité et changements de registres sémiotiques l'analyse de stratégies d'enseignement et d'apprentissage en inter-didactique des mathématiques et de la physique. En particulier, en ce qui concerne l'étude du concept de résistance, *via* la loi d'Ohm, ce modèle met en évidence que les enseignants supposent la continuité des registres du graphique cartésien et de l'écriture formelle algébrique dans les opérations de changement de cadres de rationalité. De même ils considèrent comme naturels les passages entre registres sémiotiques dans un cadre de rationalité donné. Ils n'est pas étonnant, dès lors, qu'ils privilégient un travail de modélisation du comportement électrique du résistor basé sur une analogie supposée entre le traitement de la proportionnalité en physique et en mathématique. Mais les difficultés rencontrées par les élèves imposent de s'interroger sur le bien-fondé de ces conceptions d'enseignants. En effet, de nombreux obstacles [représentés par des ? dans la figure 6 apparaissent à l'occasion des changements de cadres et de registres.

illusion
de continuité
de registre
inter cadres
de rationalité

illusion de
transparence
des registres
intra cadre
de rationalité

Certains apparaissent à l'occasion du passage d'un registre (graphique, algébrique, etc.) du cadre de rationalité de la physique à celui des mathématiques (ou inversement) : ils sont liés à la discontinuité des signifiants, des règles de combinaison de ces signifiants et des règles de rationalité qui caractérisent les registres d'un cadre de rationalité. D'autres obstacles apparaissent à l'occasion des changements de registres dans un cadre de rationalité donné : ils sont liés au problème de la non-congruence sémantique et à la difficulté que rencontrent les élèves pour coordonner des registres sémiotiques différents.

Figure 6. Obstacles liés aux changements de registres sémiotiques et aux changements de cadre de rationalité



nécessité d'une
approche inter-
disciplinaire de la
conceptualisation

La conceptualisation scientifique dans l'esprit des élèves ne s'arrêtant pas aux bornes des disciplines, il reste à concevoir des stratégies méthodologiques dépassant la dimension disciplinaire qui leur permettent de franchir ces obstacles.

Didier MALAFOSSE
Alain LEROUGE
Laboratoire ERES, Université Montpellier II
(Groupe I.U.F.M.)

BIBLIOGRAPHIE

- ARTIGUE, M. (1988). Ingénierie didactique. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 9, 3, 281-308.
- BUNGE, M. (1983). *Épistémologie*. Paris : Éditions Maloine, Coll. *Recherches Interdisciplinaires*.
- DUVAL, R. (1988a). Écarts sémantiques et cohérence mathématique : introduction aux problèmes de congruences. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, 1, 7-25.
- DUVAL, R. (1988b). Graphiques et équations : l'articulation de deux registres. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, 1, 235-253.
- DUVAL, R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives de l'IREM de Strasbourg*, 5, 37-65.
- DUVAL, R. (1995). Quel cognitif retenir en didactique des mathématiques ? In *Actes de la VIII^e École d'été de Didactique des Mathématiques* (pp. 198-214).
- JOHSUA, S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, 8, 29-53.
- JOHSUA, S. (1994). Quelques conditions d'évolution d'un objet d'enseignement en physique : l'exemple des circuits électriques (1902-1980). In G. Arsac, Y. Chevallard, J.-L. Martinand & A. Tiberghien. *La transposition didactique à l'épreuve* (pp. 9-33). Grenoble : La Pensée Sauvage.
- LEROUGE, A. (1992). *Représentation cartésienne, rationalité mathématique et rationalité du quotidien chez des élèves de collège*. Thèse de doctorat, Université Montpellier II.
- LEROUGE, A. (2000). La notion de cadre de rationalité. À propos de la droite au collège. Article à paraître dans la revue *Recherches en Didactique des Mathématiques*.
- MALAFOSSE, D. (1999). *Contribution à l'analyse et à la modélisation des processus de conceptualisation en inter-didactique des mathématiques et de la physique : exemple de la loi d'Ohm*. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II.
- MALAFOSSE, D. (2000). Pertinence des notions de cadre de rationalité et de registre sémiotique pour l'analyse des processus de conceptualisation en didactique de la physique. Article soumis à la revue *Recherches en Didactique des Mathématiques*.
- MALAFOSSE, D., LEROUGE, A. & DUSSEAU, J.-M. (2000). Cadre, registre et espace de réalité en didactique de la physique. *Didaskalia*, 16.
- POURPRIX, B. & LOCQUENEUX, R. (1988). G. S. Ohm et la "théorie mathématique du circuit galvanique" (1827). *Fundamenta scientiae*, 9, 4, 409-427.
- ROBARDET, G. (1995). *Didactique des sciences physiques et formation des maîtres : contribution à l'analyse d'un objet naissant*. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- ROBARDET, G. & GUILLAUD, J.-C. (1997). *Éléments de didactique des sciences physiques*. Paris : P.U.F.
- VYGOTSKI, L. S. (1934). *Thought and Language*. Cambridge (Mass.) : MIT Press.

LA PLURIDISCIPLINARITÉ DANS LES SCIENCES DE LA VIE : UN NOUVEL OBSTACLE ÉPISTÉMOLOGIQUE, LA NON-LINÉARITÉ

Janine Guespin-Michel
Camille Ripoll

La pluridisciplinarité est d'autant plus nécessaire et d'autant plus difficile à réaliser que l'on est plus "bas" dans l'échelle comtienne des sciences. Mais un nouvel obstacle est apparu il y a quelques années et persiste en biologie, au niveau même de l'utilisation de théories physiques ou de formalismes mathématiques qui pouvaient le plus contribuer à faire avancer les questionnements et les connaissances. Il s'agit de théories (ou de formalismes) non linéaires destinées à traiter de la complexité du vivant. Les difficultés rencontrées par l'introduction de ces conceptions nouvelles chez les chercheurs en biologie sont plus d'origine philosophique que d'origine scientifique, et se présentent comme un obstacle épistémologique lié notamment à la notion de déterminisme.

Il y a un paradoxe croissant entre l'appel constant à la pluridisciplinarité dans les sciences de la vie, qui en fait presque une "tarte à la crème" de la prospective scientifique, et la difficulté évidente à la faire progresser sur le terrain.

Les raisons en sont multiples, certaines sont bien connues, comme les répercussions toujours actuelles de la classification comtienne des sciences qui font notamment que les étudiants en biologie sont sélectionnés par l'échec en mathématiques, tandis que les étudiants des sciences plus "dures" ne reçoivent pas d'enseignement de biologie. D'autres sont à notre avis beaucoup moins souvent évoquées. Parmi elles, une terrible pomme de discorde, qui surgit dès que l'aspect temporel des phénomènes biologiques étudiés devient central, que nous désignerons par le qualificatif mathématique de *non-linéarité*. "Placage totalitaire" pour les uns, preuve de l'incapacité de la science et de la mort du déterminisme pour les autres, l'utilisation d'un formalisme utilisant des équations différentielles non linéaires est diabolisée ou portée aux nues d'une manière qui ressort bien plus d'un débat idéologique que scientifique. Pourtant il s'agit d'une avancée majeure des sciences mathématiques et physiques du xx^e siècle, dont les possibles applications en biologie ne peuvent pas être ignorées.

Il y a une
difficulté
évidente à faire
progresser la
pluridisciplinarité
dans les sciences
de la vie

1. PLURIDISCIPLINARITÉ ET SCIENCES DE LA VIE : ÉTAT DES LIEUX

1.1. Le rôle de la théorie dans les sciences

Lorsqu'on évoque les obstacles à l'étude pluridisciplinaire du vivant, on pense souvent à la différence des contenus des enseignements reçus par ceux qui devraient être les partenaires de telles études. L'une de ces différences est souvent sous-estimée : il s'agit du rôle et de la place de la théorie dans les différentes disciplines scientifiques et dans la recherche qui s'y effectue.

en physique,
il existe un vaste
cadre théorique
explicite

En physique, par exemple, il existe un vaste cadre théorique explicite (mécanique quantique, théorie des champs, etc.) dans lequel s'insère la pratique expérimentale de cette discipline. Dans ce cadre théorique, des modèles matériels ou de pensée permettent de formuler des hypothèses et d'en déduire des conséquences que l'on peut soumettre à l'épreuve de l'expérimentation. Presque universellement les attributs de ces modèles sont des observables quantitatifs. Une telle structure se prête bien au formalisme mathématique, et de fait, en physique, les théories sont exprimées sous une forme mathématique.

la biologie
avance sans
cadre théorique
explicite

La biologie avance sans cadre théorique explicite. La diversité et l'étendue des problèmes posés dans le champ de la discipline, leur extrême complexité conduisent souvent à favoriser des raisonnements scientifiques inductifs moins adaptés à une formalisation mathématique. L'exemple y a vertu de témoin du général. L'expérimentation y est conçue d'une façon que beaucoup de biologistes estiment "naturelle" et qui, pensent-ils, ne nécessite pas de formulation explicite préalable d'une "théorie mathématisée" (assimilant au passage théorie et mathématiques). De fait il n'y a en biologie que très peu de théories explicites et la plus prestigieuse d'entre elles, la théorie de l'évolution, est peu utilisée sauf dans le cercle restreint des biologistes de l'évolution, ou n'est utilisée que pour expliquer *a posteriori* les découvertes. Il y a encore moins de théorie exprimée mathématiquement en biologie. Le formalisme mathématique n'est généralement utilisé que pour des modèles valides localement ou de façon métaphorique, comme le souligne Henri Atlan (1979) : *"Il arrive que le langage mathématique soit utilisé par les biologistes de façon incorrecte et que pourtant 'ça marche'. C'est parce qu'il s'agit le plus souvent de métaphores et que cette utilisation correspond à des besoins – ou à des blocages – proprement biologiques, c'est-à-dire à des questions posées par le développement de la biologie elle-même. Quand on s'aperçoit que la métaphore est fautive on est, bien sûr, gêné, même si elle marche un temps ; parce qu'on voit qu'elle devient, dans la mesure où on y croit trop, un obstacle à des développements futurs. Alors on essaie de la démasquer et d'analyser*

les rôles
différents que
jouent les
théories selon
les disciplines
scientifiques sont
une difficulté
majeure de la
pluridisciplinarité
appliquée
à la biologie

les glissements de sens qui accompagnent son utilisation. Cela peut avoir pour résultat, entre autres, de retourner aux méthodes mathématiques et de poser de nouvelles questions à propos de ce qui fut métaphorisé, de telle sorte à essayer de justifier, a posteriori, les glissements initialement involontaires de la métaphore.

Il en est ainsi en ce qui concerne certains formalismes issus des mathématiques, qu'on a tenté d'utiliser pour mieux cerner les problèmes que pose la logique de l'organisation biologique."

un enseignement d'épistémologie serait particulièrement utile dans cette discipline

Un enseignement d'épistémologie serait particulièrement utile dans cette discipline. En effet, la théorie n'est évidemment pas absente chez les biologistes puisque aucune connaissance scientifique n'est possible hors d'un cadre théorique. Mais ce cadre théorique est souvent implicite et l'on peut même avancer que la conception de la quasi totalité de l'expérimentation repose sur tout un ensemble d'hypothèses implicites. L'absence d'enseignement d'épistémologie dans les cursus universitaires n'aide pas à percevoir cet état des choses. Quoi qu'il en soit, c'est peut-être au niveau du rôle de la théorie dans une discipline autant ou plus qu'au niveau du contenu même de cette discipline que se situent les plus grandes difficultés à la mise en œuvre d'une réelle pluridisciplinarité(1).

1.2. Réductionnisme et globalisme en biologie

• Opposition globalisme/réductionnisme en biologie

Réfléchir à la pluridisciplinarité implique aussi de prendre en compte que la biologie n'est pas une discipline homogène. Les différentes sous-disciplines qui la constituent se répartissent entre deux pôles qui en définissent à la fois la méthodologie et les "attitudes" (Jacob, 1979).

la démarche réductionniste fondée sur une méthodologie analytique voit son apogée avec la biologie moléculaire

Le pôle réductionniste rassemble les sous-disciplines qui s'efforcent d'analyser les êtres vivants en en recherchant les parties de plus en plus petites, considérées comme de plus en plus fondamentales. La démarche réductionniste, qui est fondée sur une méthodologie analytique, voit son apogée actuellement avec la biologie moléculaire. Ce pôle est effectivement très pluridisciplinaire comme le souligne par exemple Antoine Danchin (1980a) : *"Les progrès les plus spectaculaires de la biologie ont pris naissance au moment où l'on a pu reconnaître qu'il était possible d'analyser les êtres vivants*

(1) Nous sommes conscients du caractère succinct de notre argumentation concernant un sujet dont l'importance justifierait en fait un article à soi seul. Il nous paraissait cependant indispensable d'évoquer cet état de choses, dans la mesure où il s'agit d'une difficulté qui peut se manifester y compris au niveau de la lecture de cet article.

en n'invokant pas d'autres principes que ceux de la physique et de la chimie. Cela a permis, d'abord, de décrire l'organisation hiérarchique du vivant grâce à la mise en évidence de niveaux d'intégration successifs délimités par la dimension des objets, ou par des frontières." Nous verrons cependant que cette pluridisciplinarité a des limites et que les principes de la physique et de la chimie auxquels elle fait appel excluent ou ignorent les apports de la dynamique des systèmes non linéaires.

le pôle globaliste étudie le vivant à ses niveaux d'organisation supérieurs

Le pôle globaliste étudie le monde vivant à ses niveaux d'organisation supérieurs, organisme, écosystème, populations, dans une optique synchronique ou évolutive. Ce champ d'étude a ses méthodologies propres qui font de plus en plus appel à des méthodes statistiques et de modélisation mathématique sophistiquées. Mais les méthodologies recouvrent aussi des différences d'attitudes épistémologiques et philosophiques très importantes qui accentuent les écarts entre les tenants des deux pôles et transforment en conflit ce qui pourrait apparaître comme une complémentarité.

l'opposition réductionnisme / globalisme tend à recouvrir l'ancienne opposition mécanisme / vitalisme

Chaque pôle cristallise toute une série de positions contraires. L'opposition réductionnisme/globalisme entraîne dans son sillage respectivement les oppositions contenu/forme, local/global, fini/indéfini, discontinu/continu, instant/durée, hasard/nécessité, stochastique/déterministe, simple/ complexe (Guespin-Michel, 1998). Cette opposition tend aussi à recouvrir l'ancienne opposition mécanisme/vitalisme qui reprend de l'importance avec les positions plus ou moins ouvertement créationnistes qui fleurissent actuellement. Ces positions s'autorisent justement d'une utilisation, dont nous essaierons de montrer qu'elle est abusive, d'une certaine pluridisciplinarité. Le mot holisme utilisé souvent pour globalisme est défini par Ilya Prigogine et Isabelle Stengers (1997), comme synonyme de vitalisme : *"Le réductionnisme d'aujourd'hui est le mécanisme d'autrefois ; de même, le holisme recouvre à peu près l'ancien vitalisme. Ce rajeunissement du vocabulaire devrait au moins contribuer à écarter les confusions. Mieux vaut éviter tout rapprochement entre le mécanisme, au sens d'explication exclusive de la finalité, et la mécanique rationnelle. L'antiréductionnisme n'implique pas nécessairement l'admission de forces vitales. D'ailleurs, l'expression s'entend en au moins deux sens. Il peut s'agir soit de 'qualités occultes' (comprendons : d'entités verbales), soit de forces qui ne se manifestent que dans les organismes."*

C'est aussi l'opinion d'A. Danchin, qui présente ainsi les positions globalistes qu'il caractérise comme "antiréductionnistes" (1980b) : *"Les propriétés intrinsèques du vivant sont considérées comme irréductibles à l'analyse, seule la considération du Tout peut être explicative et il ne sert à rien de disséquer et de chercher à comprendre combien les divers éléments se composent, c'est le Tout qui impose sa matrice*

fonctionnelle aux éléments du système vivant, et qui seul permet de les comprendre... Il existe de nombreuses variétés de cette façon de voir, toujours à la mode, et il serait facile de proposer une collection de textes allant de Lamarck à Thom, de Lyssenko à Koestler, ou de Prigogine à la Nouvelle Droite, où est affirmée la toute-puissance du global et où l'attitude analytique est ridiculisée de diverses manières (la plus fréquente utilisant le terme de réductionnisme), associée à diverses connotations plus ou moins injurieuses."

pourquoi en
biologie une
opposition aussi
acharnée entre
réductionnisme
et globalisme ?

Non explicitées, ces oppositions rendent souvent le débat impossible, et les conséquences financières en terme de partage des crédits de recherche contribuent à les transformer en luttes d'influence. Pourquoi, en biologie, la complémentarité entre réductionnisme et globalisme a-t-elle tourné à un véritable combat entre des écoles se réclamant de l'un ou l'autre des deux pôles ? Pourquoi une telle attitude conflictuelle n'existe-t-elle pas ou est-elle moindre dans d'autres disciplines, au moins à leur stade actuel de développement ? Approches réductionnistes et globalistes existent pourtant dans les sciences physiques. La mécanique, fût-elle relativiste, décrit le mouvement de la matière à l'échelle macroscopique, voire cosmologique, sans faire nécessairement appel aux propriétés des atomes qui la constituent. Les propriétés chimiques macroscopiques de cette matière ne sont par contre aisément comprises qu'en faisant appel à la structure atomique et moléculaire de celle-ci. Cependant dans la physique contemporaine le passage entre les niveaux de description macro- et microscopique est assez bien compris. Par exemple la thermodynamique statistique permet de fonder dans les propriétés moléculaires de la matière la signification des variables d'état macroscopiques comme la pression ou la température ou même celles de fonctions d'état thermodynamiques plus abstraites comme l'entropie ou l'énergie interne. La nécessité des niveaux de description est admise sans difficulté ; il ne viendrait pas à l'idée de la majorité des physiciens de considérer comme "faible" une explication du fonctionnement d'un amplificateur à partir de la théorie des circuits bien que celle-ci néglige toute référence à la structure moléculaire de chacun des transistors qui le constitue.

contrairement
à ce qui
se passe dans
les sciences
physiques

• **Une tentative de dépassement de cette opposition**

En biologie le passage d'un niveau de description à un autre demeure un grand défi théorique. C'est peut-être parce qu'on comprend mal comment s'articulent les niveaux hiérarchiques du vivant que les tenants les plus "durs" des attitudes réductionnistes ou globalistes en sont venus à nier la nécessité même de comprendre cette articulation. Les réductionnistes considèrent que les propriétés d'un niveau sont "comprises" dès lors que le sont celles du niveau inférieur, attitude que l'on résume souvent dans la formule classique

à cet antagonisme s'oppose une démarche...

... qui cherche à comprendre les rapports entre les différents niveaux d'intégration du vivant...

... et qui constitue la biologie intégrative

qui fâche tout rouge les globalistes : "le tout résulte de la somme des parties". Au contraire les globalistes purs considèrent qu'il ne sert à rien de rechercher dans les propriétés d'un niveau inférieur celles du niveau supérieur, attitude que l'on résume dans la formule qui cette fois fâche tout rouge les réductionnistes intransigeants : "le tout est plus que la somme de ses parties". Au-delà des formules dont on peut en effet discuter le caractère abrupt ("tout" et "parties" s'appliquant selon le cas à des objets ou aux propriétés interactives de ces objets) la difficulté de construire des théories permettant de comprendre la hiérarchisation des niveaux du vivant a conduit à une sorte de stratification des attitudes épistémologiques en biologie. Attitudes qui fondamentalement trouvent la source de leur exclusion mutuelle dans des positions philosophiques irréductibles et qui entraînent une certaine résistance à accepter de les dépasser.

Il a pourtant été montré sur quelques exemples, qu'il existe en fait une démarche visant la synthèse et le dépassement de cette opposition réductionnisme/globalisme en en transformant les deux termes en composantes complémentaires de la réalité. Cette démarche génère des attitudes dialectiques vis-à-vis de positions philosophiques apparemment irréductibles : *"À l'heure actuelle, deux types de démarches s'apparentent à cette tentative. Celles qui cherchent à partir du niveau inférieur à comprendre le niveau supérieur en recherchant les propriétés d'émergence. Et celles qui partent des propriétés globales du niveau supérieur et qui cherchent à les préciser grâce aux connaissances sur les éléments du niveau inférieur."* (Guespin-Michel, 1998, 1980). Ces démarches, complémentaires constituent ensemble une nouvelle discipline des sciences du vivant, la biologie intégrative (Ripoll et coll., 1998). C'est, à notre avis, cette voie du dépassement qu'offrent les théories de la "non-linéarité" comme nous tentons de l'expliquer ci-après. C'est aussi pour cela que, projetée au premier plan d'un débat idéologique extrêmement fort, cette "non-linéarité" fait l'objet tout autant de rejets dogmatiques que d'incantations anti-scientifiques.

Il ne s'agit pas d'un faux débat. La vérité finit certes toujours par triompher, mais si le scientifique anglais Mitchell n'avait pas eu de fortune personnelle pour publier à compte d'auteur ses résultats sur la force chimiosmotique (cf. Guespin-Michel, 1998), combien de temps aurait-il fallu attendre pour que cette découverte émerge ? Inversement, il ne serait pas raisonnable de contribuer à financer des pseudo-recherches pour la plus grande gloire des positions anti-scientifiques, et il est normal que la communauté scientifique reste vigilante. Vigilante, mais pas retranchée dans des positions *a priori*, vigilante, mais ouverte au débat, et suffisamment tolérante vis-à-vis de ce qui est nouveau dans les autres sciences pour en oser l'utilisation, pour rechercher, comme le demande H. Atlan (1999) de *"nouveaux paradigmes en biologie"*.

2. LA NON-LINÉARITÉ : DES MATHÉMATIQUES UTILES À LA BIOLOGIE

2.1. Définition et propriétés des équations différentielles linéaires et non linéaires

la dynamique peut être considérée comme une transdiscipline qui décrit l'évolution des systèmes dans le temps

Tout dans l'univers est en mouvement ; le changement, l'évolution semblent être des caractéristiques fondamentales de l'état actuel du monde connaissable. La *dynamique* peut être considérée comme une transdiscipline dont l'objet est de décrire l'évolution des systèmes dans le temps. On peut ainsi parler de la dynamique des astres, de la dynamique des réactions chimiques, de celle des échanges thermiques entre les océans et l'atmosphère terrestre, etc. La vie est éminemment un phénomène dynamique. Les mathématiques offrent au "dynamicien" toute une panoplie de modèles et de langages permettant de formaliser l'évolution des processus. Considérons le plus important d'entre eux, le système d'équations différentielles. Il s'écrit simplement $dx/dt = f(x,t;\mu)$, où dx/dt représente l'ensemble des dérivées temporelles des variables du système (mathématiquement c'est une matrice colonne) et $f(x,t;\mu)$ l'ensemble des fonctions (autre matrice colonne) décrivant les causes des changements qui vont se produire dans le système ; t est évidemment le temps et μ l'ensemble des paramètres du système (constantes de vitesses de réactions chimiques, taux de mortalité et de fécondité des différentes espèces d'une niche écologique, etc.).

les mathématiques offrent toute une panoplie de modèles et de langages

Pour beaucoup de systèmes importants $f(x,t;\mu)$ se réduit à $f(x;\mu)$, on parle alors de systèmes "autonomes". Dans la plupart des cas réels, $f(x;\mu)$ est une fonction non linéaire des variables x . Ce qui signifie que la cause du changement généré par une somme de variables n'est pas égale à la somme des causes relatives à chaque variable isolée : $f(x+y;\mu) \neq f(x;\mu) + f(y;\mu)$. Les systèmes chimiques et enzymatiques, dans lesquels les x sont les concentrations de différentes espèces, sont des exemples familiers de systèmes non linéaires.

Quel est le problème posé par les équations non linéaires ? C'est tout simplement que dans la quasi totalité des cas on ne peut pas, après s'être donné une condition initiale ($x = x_0$ connue pour un temps t_0 choisi comme origine), écrire explicitement la solution du système d'équations différentielles. Constatation fâcheuse qui peut être surmontée de deux façons très différentes. La première est de n'envisager que de petites variations de x autour d'une valeur de référence, particulière ; alors $f(x;\mu)$ peut être remplacé par une approximation linéaire. Par exemple, si l'on "reste le nez collé" sur une boule et que l'on ne s'autorise que de petits déplacements autour d'un point à la surface de cette boule, alors cette surface nous apparaîtra localement plate (la Terre fût long-temps plate). La deuxième façon de surmonter les difficultés

l'utilisation des ordinateurs a permis d'explorer les trajectoires des équations représentant des dynamiques non linéaires

quelles sont
les différences
entre équations
linéaires et
non linéaires ?

de résolution des systèmes non linéaires, c'est l'analyse numérique et la simulation sur ordinateur, qui ont enfin permis d'explorer les propriétés de ces équations.

Quelles sont les différences entre équations linéaires et non linéaires ? On démontre en mathématiques que les systèmes linéaires admettent une solution unique, $x_s(t)$, explicite dès lors que l'on se donne une condition initiale (voir plus haut). Ainsi le comportement futur du système est entièrement prédictible à partir de la connaissance de son état présent, il est déterminé par la nature, linéaire, des fonctions f . De plus pour des contraintes données, les variables x_s finissent par acquérir des valeurs qui ne changent plus au cours du temps, des valeurs stationnaires. Bien sûr si on modifie les contraintes ou encore un ou plusieurs paramètres μ du système, les variables vont à nouveau évoluer et finir par prendre de nouvelles valeurs stationnaires. Au fond ceci revient à modifier les conditions initiales et à suivre la marche du système vers un nouvel état stationnaire. Avec les systèmes linéaires tout se passe de façon continue et parfaitement prédictible. Si on change peu les contraintes ou un paramètre ou les conditions initiales, le nouvel état stationnaire ne changera lui aussi que peu par rapport à l'ancien.

• Des "bifurcations"

on a découvert
les propriétés
nouvelles
des systèmes
non linéaires
comme
l'existence de
bifurcations...

Avec les systèmes non linéaires, ou plus exactement avec certains d'entre eux, si on modifie un paramètre pertinent au-delà d'une valeur critique, il peut se produire un changement qualitatif du comportement dynamique. Par exemple, en continuant de faire varier le paramètre au-delà de sa valeur critique il se peut qu'il existe non pas une, mais deux façons nouvelles de faire varier les états stationnaires, deux routes en quelque sorte. Un tel phénomène s'appelle une bifurcation. Dans les processus réels le choix aléatoire de l'une de ces routes fait intervenir ce que les physiciens appellent des fluctuations dont l'ensemble forme une sorte de bruit permanent d'origine microscopique (par exemple lié au mouvement des molécules) superposé à l'état moyen du système observable dans la quasi-totalité de nos expériences. L'une de ces routes peut aussi conduire à des oscillations entretenues tant que seront maintenues les contraintes. De plus il peut exister de multiples points de bifurcation, parfaitement déterminés par la nature des équations non linéaires $f(x;\mu)$. Il est facile de comprendre qu'étant donné le caractère aléatoire, probabiliste, du franchissement d'une bifurcation, l'état actuel du système dépendra de son histoire évolutive antérieure. C'est ce que Prigogine appelle "*l'entrée de l'histoire dans les systèmes dynamiques*" (Prigogine et Stengers, 1979.). Cette imprédictibilité de connexion entre les différents régimes d'un système dynamique déterministe non linéaire est l'un des points de fixation du débat épistémologique autour de la non-linéarité, nous y revenons plus bas.

• **Une sensibilité extrême aux conditions initiales (le chaos déterministe)**

... la sensibilité
aux conditions
initiales...

Ce débat est encore alimenté par une propriété connue sous le nom métaphorique "d'effet papillon". Certains processus non linéaires sont en effet très sensibles aux conditions initiales ; il suffit de changer très peu ces dernières pour déclencher un changement considérable dans le comportement dynamique du système, ceci se poursuivant longtemps après ce changement déclencheur. D'où le nom d'effet papillon : "quand un papillon bat de l'aile au Japon, il peut créer une tempête à Paris". Si on observe le comportement du système au cours du temps, il semble sans ordre, chaotique. On a donné le nom de chaos déterministe à cette propriété, et le choix du mot "chaos" est sans doute responsable de beaucoup de malentendus.

• **L'émergence de structures spatio-temporelles**

... l'auto-
organisation
de structures
spatio-
temporelles

Pour terminer ce survol des propriétés de la non-linéarité, il faut évoquer la relation temps-espace dans les systèmes dynamiques non linéaires. En effet dans la construction de modèles destinés à représenter un phénomène réel, hydrodynamique, biochimique, etc. les variables x n'ont généralement pas la même valeur en tout point du système et elles y changent au cours du temps. Mathématiquement le modèle précédent devient un modèle d'équations aux dérivées partielles qu'il est inutile d'explicitier ici (voir par exemple Nicolis et Prigogine, 1977). Les systèmes linéaires ont cette fois encore un comportement simple. Il suffit de se donner les conditions initiales (aspect temporel) et les conditions aux limites (aspect spatial) pour établir la solution unique du problème. Que peut-il se passer de nouveau avec les systèmes non linéaires ? Par exemple, à partir d'une certaine taille critique un système homogène devient instable, et il peut apparaître un nouvel état stable qui, lui, n'est pas homogène dans l'espace. Il émerge du milieu uniforme une structure spatiale. C'est un autre exemple de bifurcation connu sous le nom de bifurcation de Turing (c'est par exemple la vitesse différente de diffusion de certaines molécules qui tend à créer des rétroactions déstabilisantes sur le système). Dans d'autres cas, les structures spatio-temporelles peuvent prendre la forme d'ondes de formes très diverses. Ces structures qui n'apparaissent que loin de l'équilibre (au voisinage de l'équilibre les systèmes sont linéaires) ont été appelées structures dissipatives (Glansdorff et Prigogine, 1970). L'une de leurs propriétés, majeure, est d'établir une cohérence macroscopique dans le fonctionnement du processus dynamique. Cette structure est autant le produit de l'activité du système que la cause de cette activité. Sans son activité le système en tant que structure n'existe pas, et réciproquement. Cette propriété, qui conduit, dans certains cas bien entendu, à réviser la causalité linéaire de structure vers fonction, n'a strictement rien de mystérieux mais est pourtant déran-

geante. Elle l'est d'autant plus que la source de l'émergence de l'ordre est également bien connue : c'est le désordre. Ceci a été appelé "*l'ordre par fluctuations*" (Glansdorff et Prigogine, 1970) ou sous une autre forme, en se référant à la théorie de l'information, "*l'ordre à partir du bruit*" (Atlan 1979).

L'ensemble de ces propriétés d'organisation des systèmes dynamiques non linéaires, pour lesquelles, on l'a vu, les conditions externes "coopèrent" avec les propriétés internes pour faire émerger des structures spatio-temporelles, est rassemblé dans le concept d'auto-organisation.

2.2. Utilisation de la non-linéarité en sciences expérimentales

En quoi les modèles mathématiques non linéaires, et leur cortège de propriétés nouvelles concernent-ils les sciences expérimentales et la biologie en particulier?

en physique
et en chimie,
une littérature
très abondante
décrit les
phénomènes
non linéaires

Il existe une littérature très abondante en physique et en chimie qui décrit des phénomènes non linéaires sources de structures dissipatives spatio-temporelles ou de chaos. En mécanique des fluides, par exemple, les instabilités de Bénard et de Taylor (formation dans un liquide, loin de l'équilibre thermique, de petites cellules convectives occupant toute l'étendue du fluide) sont des exemples bien connus de ces structures. En chimie la réaction de Bélousov-Zhabotinski est l'archétype de réaction chimique oscillante ou générant des structures spatiales dissipatives de type ondes ou spirales (Vidal et Lemarchand, 1988). On connaît aujourd'hui des dizaines de réactions chimiques oscillantes. Elles ont souvent des mécanismes très complexes mais certaines d'entre elles ont pu être modélisées par des systèmes d'équations différentielles non linéaires.

les systèmes
composant
le vivant sont
souvent régis
par des
dynamiques
non linéaires...

En biologie, pratiquement tous les niveaux d'organisation du vivant ont fait l'objet de modèles non linéaires. En biochimie, au niveau des réactions entre molécules, on peut citer l'exemple des oscillations de la glycolyse (Goldbeter, 1990) et en biologie cellulaire, celui de la signalisation intracellulaire par le calcium ou du cycle cellulaire (Goodwin, 1994). On a donné de l'organisation multicellulaire et de la genèse des formes (la morphogenèse) des modèles qui sont de véritables prototypes des approches non linéaires : l'agrégation des amibes acrasiales (Goldbeter, 1990) et la théorie des morphogènes, initialement proposée par Turing en 1952, qui permet par exemple de comprendre la genèse des motifs que l'on peut observer sur le pelage des animaux (Murray, 1988). C'est peut-être en écologie et en dynamique des populations que les modèles non linéaires ont été les plus utilisés. Le modèle historique de Lokta-Volterra (1926) décrivant les oscillations du nombre de proies et de leurs prédateurs dans un écosystème est un archétype en la matière. Il a aujourd'hui donné naissance à des modèles bien plus sophistiqués (le lecteur intéressé par les aspects techniques et mathématiques de ces

modèles peut se référer au livre de Murray, 1993). Des aspects très caractéristiques de la dynamique non linéaire se retrouvent dans des processus biologiques de grande importance. La multistationnarité (existence potentielle de plusieurs états stables pour un système dans des conditions données, mais dont un seul est réalisé, déterminé par l'histoire antérieure du système) est un concept très attractif pour expliquer, au niveau cellulaire, les phénomènes de différenciation ou d'épigenèse (Thomas, 1973). Du chaos déterministe a été découvert dans des processus physiologiques divers (ou dans leur altération pathologique) comme les battements cardiaques ou l'épilepsie.

D'autres auteurs ont cherché à établir une théorie plus globale de la complexité, faisant largement appel à la non-linéarité et reposant sur des modèles mathématiques divers. Ils ont proposé des théories sur l'origine de la vie, l'évolution, la différenciation (Kauffman, 1995 ; Atlan, 1979 ; Prigogine et Stengers, 1979). Ces théories ont en commun la prise en compte de la notion de complexité comme double métaphore, complexité/vivant et complexité/non-linéarité (Gell-Mann, 1994). Sur l'ensemble de ces sujets, voir le livre de Michel Laurent (1999) et pour une histoire de l'introduction de ces notions, Gleick (1987) et Ruelle (1991).

Cette énumération, non exhaustive loin s'en faut, d'utilisation de modèles non linéaires en biologie (parfois simplement de façon métaphorique d'ailleurs) pour rendre compte des propriétés essentielles du vivant (produit de l'auto-organisation, historicité, devenir, adaptation, etc.), peut laisser croire que les théories non linéaires occupent d'ores et déjà une place centrale en biologie. Il n'en est rien et nous pensons que l'intervention de facteurs idéologiques, questionnant la place du déterminisme dans les sciences, est une cause très importante de cet état de choses.

2.3. Non-linéarité et idéologie : le déterminisme en question

Le débat autour du déterminisme est extrêmement compliqué. S'y enchevêtrent de multiples pistes, s'y opposent des conceptions du monde contradictoires dont certaines ne sont pas explicitées, voire sont volontairement masquées et s'y utilisent, sous forme de métaphore ou non, des concepts mathématiques pas toujours maîtrisés par leurs utilisateurs (Sokal et Bricmont, 1997). Comme chaque fois qu'un débat scientifique masque et recouvre un débat idéologique, les polémiques sont extrêmement virulentes. Telles ont été, par exemple au XIX^e siècle, les polémiques qui ont marqué l'avènement de la théorie cellulaire, et dont Georges Canguilhem a si bien montré qu'elles recouvraient aussi un débat sur l'individualité qui séparait républicains et royalistes (Canguilhem, 1969). Ici, croyons-nous, le débat oppose scientifiques (matérialistes ou positivistes) et ceux que l'on

... pourtant
les formalismes
non linéaires
sont extrême-
ment peu
utilisés par
les biologistes

une des
difficultés
de l'utilisation
d'une
mathématique
non linéaire...

qualifie souvent de “créationnistes” même si, en France, ils se présentent rarement ainsi.

- Nous avons vu ci-dessus l'origine du problème dans l'imprédictibilité de certaines trajectoires pour des processus obéissant à des dynamiques non linéaires. Face à cela, plusieurs attitudes s'affrontent, et l'utilisation différente du vocabulaire masque ou accroît des divergences d'opinion. Pour certains, le terme “déterminisme” conserve le sens qu'il a chez Claude Bernard (Israël, 1992), et qui le rend synonyme de prédictibilité, il y a alors deux positions extrêmes en ce qui concerne l'utilisation du formalisme non linéaire dans les sciences.

- Les uns nient, au nom du déterminisme scientifique, la possibilité d'une trajectoire non prédictible lors d'une bifurcation. Les modèles que nous avons décrits ci-dessus sont admis comme un “jeu” mathématique mais en aucun cas ne sont considérés comme pertinents pour des processus réels. On déclare donc non scientifique, l'utilisation d'un formalisme non linéaire.

- À l'opposé, d'autres concluent de l'existence d'un tel formalisme, dont la pertinence physique n'est pas *a priori* écartée, que le déterminisme doit être rejeté (mort du déterminisme). Mais ce dernier “camp” n'est pas homogène et il faut encore y distinguer deux positions radicalement différentes (bien qu'elles soient souvent confondues).

- Pour l'une, le déterminisme strict correspond à une conception révolue de la science qu'il faut remplacer par une autre conception scientifique; cette position est défendue par Prigogine et Stengers (1997) par exemple : *“...ce fait culturel et historique qui confère à l'effort scientifique le sens d'une quête d'intelligibilité. La question est alors de savoir dans quelle mesure l'identification de cette intelligibilité au déterminisme définit une science historiquement datable, ou, comme le mathématicien René Thom le soutient, caractérise l'essence même de la science... Au déterminisme des évolutions vers l'équilibre ou vers un état stationnaire proche de l'équilibre se substitue, loin de l'équilibre, une problématique où les notions de stabilité et d'instabilité sont primordiales. C'est de la stabilité ou de l'instabilité du régime d'activité par rapport aux fluctuations que dépend la pertinence de la définition du système en termes de ses variables externes et internes. Aux points de bifurcation, cette définition ne permet pas de prévoir le comportement, mais seulement de comprendre les raisons pour lesquelles une fluctuation incontrôlable, loin de rester sans conséquence, pourra s'amplifier jusqu'à mener le système vers un nouveau type de régime d'activité qualitativement différent.”*

- Pour l'autre, le déterminisme reste associé à la science dont le formalisme non linéaire montrerait alors les limites. La science qui ne sait plus prédire est discréditée. C'est la “mort

... vient de ses répercussions sur la notion de déterminisme

de la science”, position irrationaliste relayée par le créationisme.

à des
dissensions
philosophiques
réelles,
s'ajoutent des
ambiguïtés liées
à des définitions
différentes du
déterminisme...

On voit combien différent fondamentalement ces deux positions par rapport au déterminisme. Bien que proclamant toutes deux les limites du déterminisme elles s'inscrivent, l'une dans une démarche de prise en compte des avancées scientifiques (ce qui ne veut pas dire, tant s'en faut, qu'elle soit adoptée sans interrogation par la majorité des scientifiques, y compris des physiciens), l'autre dans une perspective ouvertement anti-scientifique.

... notamment
la confusion
entre
déterminisme
et prédictibilité

- Au fond toutes ces oppositions ou parfois ces dérives ne sont-elles pas nourries par l'assimilation systématique du déterminisme à la prédictibilité? Tous les systèmes non linéaires dont nous avons discuté ici sont parfaitement déterminés dans ce sens que, dès lors que les conditions en sont réunies, une bifurcation ne peut que se produire. Elle est déterminée comme n'importe laquelle des trajectoires qui la précède ou la suit. Ce qui ne peut généralement pas être prédit, en revanche, c'est laquelle de ces trajectoires sera effectivement choisie (en science, prédire c'est spécifier de façon certaine la succession temporelle des états d'un système). Cette position n'est pas sensiblement différente, au vocabulaire près, de celle défendue par Prigogine. Et on peut résumer avec Dahan Dalmedico et coll. (1992) : *“il est des systèmes dynamiques qui, pour avoir des avènements parfaitement déterminés, n'en sont pas moins imprédictibles. En d'autres termes, il suffit d'une légère imprécision sur leur état pour que leur comportement échappe à la prédiction. C'est la désormais célèbre sensibilité aux conditions initiales... Est-ce que pour autant on ne peut rien dire? Ce livre montre comment, tant en mathématiques qu'en physique, de tels systèmes sont apparus, sur les pages ou les écrans d'ordinateurs des uns, dans les expériences des autres, et comment de nouveaux modes de description permettent de les appréhender.”*

2.4. Non-linéarité et idéologie : débats et polémiques

L'effort, fait au paragraphe précédent, d'analyse de la diversité des positions vis-à-vis de la non-linéarité et du déterminisme est, pensons-nous, utile même s'il est forcément réducteur (beaucoup de positions sont plus nuancées que ne le suggère notre classification un peu simpliste). Cependant le débat autour du déterminisme, qu'il reflète ou non de véritables divergences, n'est pas encore suffisant pour expliquer les polémiques violentes qui surgissent autour de la non-linéarité. Il faut comprendre quels autres présupposés idéologiques et philosophiques les alimentent.

Antoine Danchin, scientifique de renom qui a beaucoup œuvré à la mise en place d'une pluridisciplinarité en biologie

Antoine
Danchin
dans un article
de 1980...

(la génomique ou bio-informatique), a écrit en 1980 un article très polémique dans la revue *"Le Débat"* (Danchin, 1980b), où il attaque les travaux de plusieurs chercheurs utilisant des formalismes non linéaires ; l'article se termine ainsi : *"Il s'agit là de cas typiques de placages, de formalismes (parfois très élaborés) sur la réalité et utilisés comme justifications du principe du primat du global (qui n'est, évidemment, jamais remis en cause). Ce placage évite la confrontation contradictoire avec les faits, il évite aussi la contradiction logique (à coup sûr, un appareil mathématique aussi élaboré que celui de la topologie différentielle est logiquement cohérent) et fort de son succès interne (dû à sa cohérence logique), peut faire croire à son adéquation à la réalité."*

... soulève
une polémique
violente...

Les trois théories mises en cause, ou plutôt l'application de ces trois théories à la biologie qu'il conteste, sont la théorie des catastrophes (topologie mathématique) de René Thom (Thom, 1983), celle des structures dissipatives (physique et chimie) de Prigogine (Prigogine et Stengers, 1979) et celle de l'ordre par le bruit (théorie de l'information) illustrée en particulier par Atlan (1979). On peut alors se demander en quoi l'utilisation des lois de la physique et de la chimie qui a fait selon cet auteur la scientificité de la biologie (cf. citation ci-dessus, Danchin, 1980a), devient placage lorsqu'il s'agit des structures dissipatives par exemple et pourquoi le débat prend un tour aussi âpre et passionnel ? Ce qui ressort le plus de l'article de Danchin, c'est le refus de toutes les théories basées sur la non-linéarité, au nom du refus (que nous partageons) d'une attitude globaliste (ou holiste) confondue avec un vitalisme "moderne". C'est ce que révèle un autre passage du même article : *"Le principe sous-jacent à toutes ces attitudes, qu'on peut qualifier d'attitudes holistes, est l'introduction d'un principe d'émergence de l'être, qualité essentielle du monde dont on postule l'existence en dehors de la matière... À cet égard la thermodynamique est un outil de choix, puisqu'il est possible de faire sans cesse un va-et-vient confus entre le macroscopique et le microscopique, entre le déterministe et l'indéterministe, afin d'imposer n'importe quel point de vue. Le concept d'énergie peut alors servir à tout, et l'on parlera d'énergie psychique, par exemple ; de même, le concept d'entropie servira à véhiculer une idéologie de l'ordre..."*

On ne peut qu'être frappé par l'amalgame constant entre les niveaux scientifique et idéologique de cette polémique; amalgame qui, de la part d'un auteur aussi rigoureux qu'Antoine Danchin, doit forcément attirer l'attention et suggérer que certains des tenants de ces positions en font un outil de guerre contre la rationalité et la science (cf. le n° 115 de *Raison présente*, consacré à ce problème). Cependant, il faut faire attention : une méthode doit-elle être rejetée parce qu'elle est susceptible d'être dévoyée ?

... qui montre un amalgame entre notions scientifiques et idéologiques

On peut aussi, puisque cet article date de 1980, reconnaître qu'en effet les théories critiquées par A. Danchin n'ont pas été extrêmement productrices en terme d'expérimentations et d'avancées concrètes des connaissances en biologie. Mais en ont-elles eu la possibilité ? Depuis 1980, et contrairement à ce que semble dire cette citation, ces théories ont été bannies de l'enseignement de la biologie, rares sont les biologistes qui en ont eu connaissance, plus rares encore ceux qui ont eu les moyens d'expérimenter en s'appuyant sur l'une ou l'autre d'entre elles. La suspicion dans laquelle est tenue toute mathématique tout court, et particulièrement toute mathématique non linéaire, est bien illustrée dans une anecdote racontée par René Thomas (communication personnelle). Il a cherché à publier un article contenant à la fois des résultats expérimentaux concernant la régulation d'un virus bactérien (qui, seuls, auraient été publiés dans un excellent journal de microbiologie fondamentale) et un modèle non linéaire basé sur les circuits logiques et les boucles de rétroaction positives, sur lequel étaient appuyées les expériences. L'article n'a pu être publié que dans une revue théorique.

3. PERSPECTIVES

le modèle de l'opéron a ouvert la voie à la biologie moléculaire, mais l'étude des conséquences des rétroactions reste à faire

Comment trouver une issue à ces difficultés ? En 1964, l'attribution du prix Nobel aux trois chercheurs français, André Lwoff, François Jacob et Jacques Monod consacrait la validité d'un modèle biologique, le modèle de l'opéron (Jacob et Monod, 1961) dans lequel des rétroactions (positives ou négatives) sont à la base de systèmes de régulation, c'est-à-dire d'un modèle montrant l'importance fondamentale de réactions de type non linéaire en biologie. Dans le même temps cet aspect des choses était totalement oblitéré par la méthode dite "physico-chimique" d'exploration de cette réalité, méthode qui allait devenir exclusive et, c'est indéniable, conduire aux résultats de toute première importance de la biologie moléculaire. Là encore on a eu une sorte de "bifurcation" : de deux voies possibles d'exploration des conséquences de la découverte du modèle de l'opéron, une seule a été développée. Est-ce à dire qu'elle est la seule utile ? Que l'autre était un leurre ? Ou est-ce à dire qu'une voie possible est encore plus que largement inexplorée, et qu'elle pourra peut-être permettre de répondre aux questions que la biologie moléculaire laisse sans réponse. Ces questions commencent à se poser de façon tout à fait officielle. Voici par exemple ce qu'écrit François Gros (1993) : *"Mais si j'ai dit que la démarche descendante vers le moléculaire, vers l'atome constitutif du vivant avait également quelque chose d'illusoire, c'est bien évidemment, parce que, au fil de l'évolution des molécules abiotiques, après des millions et des millions d'années, le vivant, résultat d'épreuves et de choix successifs,*

est devenu un ensemble extraordinairement intégré. Intégré par rapport à lui-même et par rapport au non-vivant. ... Ainsi donc, ayant remarquablement démonté la mécanique, il nous faut non seulement la remonter mais étudier à nouveau comment elle fonctionne. Ou, pour employer l'image qui nous est chère, le spéléologue doit refaire surface à partir des entrailles de la cellule. Il est temps d'analyser, d'observer celle-ci dans son véritable contexte, merveille de communication, d'échanges, d'intégration. Il est temps de redevenir physiologistes, forts de notre voyage au centre de la cellule, afin de contempler, de comprendre et d'aimer la magnifique diversité du monde vivant pris dans son ensemble. Notre façon d'en embrasser l'ampleur et la qualité ne sera certes plus la même..."

doit-on rejeter
l'outil
mathématique
nouveau au nom
des dérives qu'il
peut entraîner
ou peut-on
se garder de
ces dérives
lorsqu'elles
sont une
conséquence
d'une utilisation
idéologique ou
philosophique
abusive de
cet outil ?

On peut aussi lire à ce propos l'ouvrage récent d'Atlan (1999) : *La fin du tout génétique*. Mais cette voie implique vraisemblablement une approche pluridisciplinaire incluant l'utilisation (au moins sous forme de métaphore) de formalismes non linéaires, en dépit de tous les obstacles idéologiques qu'A. Danchin souligne. Doit-on rejeter l'outil mathématique nouveau au nom des dérives qu'il peut entraîner chez certains, doit-on l'utiliser en dépit de ces dérives ou peut-on se garder de ces dérives si elles ne sont qu'une conséquence d'une utilisation idéologique ou philosophique abusive de cet outil ?

C'est là que surgit à nouveau le problème du déterminisme. Le matérialisme (réalisme) qui fonde la science (Lecointre, 1999) telle que la majorité des chercheurs l'entendent, qui fonde notamment la répétabilité des expériences est-il nié par un formalisme non linéaire ? La conception d'états multistationnaires, voire de comportements chaotiques, en biologie menace-t-elle la science ? Les notions d'émergence, d'auto-organisation, qui résultent également de l'utilisation de ces formalismes, et qui remettent en cause (Kauffmann, 1985) l'idée que l'origine de la vie est un hasard totalement improbable qui ne peut s'être produit qu'une fois (Monod, 1970), sont-elles seulement un jouet permettant de dépenser les crédits de la NASA, ou sont-elles utiles d'un point de vue heuristique ?

Janine GUESPIN-MICHEL
Camille RIPOLL
Institut fédératif de recherche sur les Systèmes
Intégrés,
Faculté des sciences, Université de Rouen

BIBLIOGRAPHIE

- ATLAN, H. (1979). *Entre le cristal et la fumée*. Paris : Le Seuil.
- ATLAN, H. (1999). *La fin du tout génétique : vers de nouveaux paradigmes en biologie*. Paris : INRA éditions.
- CANGUILHEM, G. (1969). *Connaissance de la vie*. Paris : Vrin.
- DAHAN DALMEDICO, A., CHABERT, J.-L., CHEMLA, K. (éds.) (1992). *Chaos et déterminisme*. Paris : Le Seuil, coll. *Points sciences* (P 5).
- DANCHIN, A. (1980a). Règles de réécriture en biologie moléculaire. *Le Débat*, 3, 111-112. Paris : Gallimard.
- DANCHIN, A. (1980b). L'invasion du biologisme. *Le Débat*, 2, 66-81. Paris : Gallimard.
- GELL-MANN, M. (1994). *Le quark et le jaguar*. Paris : Flammarion, coll. *Champs*.
- GLANSDORFF, P. & PRIGOGINE, I. (1970). *Structure, stabilité et fluctuations*. Paris : Masson.
- GLEICK, J. (1987, traduction française : 1989). *La théorie du chaos : vers une nouvelle science*. Paris : Flammarion, coll. *Champs*.
- GOLDBETER, A. (1990). *Rythmes et chaos dans les systèmes biochimiques et cellulaires*. Paris : Masson.
- GOODWIN, B. (1994). *How the leopard changed its spots – the evolution of complexity*. Londres : Weidenfeld & Nicolson.
- GROS, F. (1993). *Regard sur la biologie contemporaine*. Folio essais, p. 293.
- GUESPIN-MICHEL, J. (1980). Peut-on parler de biologie théorique? *La Pensée*, 211, 105-118.
- GUESPIN-MICHEL, J. (1998). Réductionnisme et globalisme en biologie. *La Pensée*, 316, 77-91.
- ISRAËL, G. (1992). L'histoire du principe de déterminisme et ses rencontres avec les mathématiques. In A., Dahan Dalmedico, J.-L., Chabert, K., Chemla (éds.). *Chaos et déterminisme*. Paris : Le Seuil.
- JACOB, F. & MONOD, J. (1961). Genetic regulatory mechanism in the synthesis of proteins. *J. Mol. Biol.*, 3, 318-356.
- JACOB, F. (1970). *La logique du vivant*. Paris : Gallimard. (Pp. 14-16)
- KAUFFMAN, S. (1995). *At home in the universe : The search for laws of complexity*. Londres : Penguin Science.
- LAURENT, M. (1999). *La puissance du vivant, dynamique des systèmes biologiques*. Paris : Hermann.

- LECOINTRE, G.(1999). Des scientifiques s'égarent. *Pour la science*, 259.
- MONOD, J. (1970). *Le hasard et la nécessité*. Paris : Le Seuil.
- MURRAY, J. D. (1988). How the leopard gets its spots. *Scientific American*, 258, 62-69.
- MURRAY, J. D. (1993). *Mathematical biology (2nd edition)*. Berlin : Springer.
- NICOLIS, G. & PRIGOGINE, I. (1977). *Self organization in non equilibrium systems*. New York : Wiley and Sons.
- PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. (1979). *La nouvelle alliance*. Paris : Gallimard. (P. 159)
- PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. (1997). Hasard et nécessité. *Encyclopædia Universalis*.
- RIPOLL, C., GUESPIN-MICHEL, J., NORRIS, V. & THELLIER, M. (1998). Defining Integrative Biology. *Complexity*, 4, 19-20.
- RUELLE, D. (1991). *Hasard et chaos*. Paris : Éditions Odile Jacob.
- SOKAL, A. & BRICMONT, J. (1997). *Impostures intellectuelles*. Paris : Éditions Odile Jacob.
- THOM, R. (1983). *Paraboles et catastrophes*. Paris : Flammarion, coll. *Champs*.
- THOMAS, R. (1973). Boolean formalization of genetic control circuits *J. theoret. Biol.*, 42, 563-585.
- VIDAL & LEMARCHAND (1988). *La réaction créatrice*. Paris : Hermann.
- Raison présente*, 115 (1995).

LES ORIGINES DE LA VIE : UN PROBLÈME, DES DISCIPLINES

Stéphane Tirard

Au cours du xx^e siècle les travaux sur les origines de la vie ont abouti à la constitution de modèles complexes et pluridisciplinaires.

Dans une première partie, une approche historique permet de montrer les fondements de cette pluridisciplinarité. Les modalités selon lesquelles elle intervient dans la structuration et la formulation des modèles sont analysées dans un second temps. Ces éléments éclairent ensuite la réflexion sur les conséquences didactiques de cette pluridisciplinarité.

les théories
sur les
origines de
la vie
émises au
xx^e siècle...

Les théories sur les origines de la vie, émises au cours du xx^e siècle, ont toutes en commun de proposer des récits décrivant les étapes de l'évolution de la matière minérale jusqu'au vivant. Fondamentalement ces énoncés rapprochent des données scientifiques d'origines diverses qui dépassent largement les seuls cadres de la chimie et de la biologie.

... des
propositions
pluridisciplinaires

Nous envisagerons donc ces théories comme des propositions *pluridisciplinaires*, ce terme étant entendu dans son acception simple de rapprochement et d'articulation entre des disciplines ou des domaines différents de la science moderne. Notre objectif est de révéler les modalités de la dynamique de cette association de données, afin de mieux analyser ensuite la structure complexe des modèles que nous devons enseigner.

La première partie de cette étude sera consacrée à une présentation de certains aspects de l'histoire des théories sur les origines de la vie au xx^e siècle et à une mise en évidence de la pluridisciplinarité opérant en leur sein.

Cette approche se poursuivra dans un second temps par une analyse des modalités de la mise en œuvre de la pluridisciplinarité dans la formalisation de ces théories.

La dernière partie tentera de cerner les conséquences de cette spécificité dans l'apprentissage de ces théories.

1. MISE EN ÉVIDENCE HISTORIQUE DE LA PLURIDISCIPLINARITÉ DANS LA CONSTITUTION DES THÉORIES SUR LES ORIGINES DE LA VIE

1.1. Les textes fondateurs

les premières propositions

Parmi les écrits fondateurs de la biogenèse évolutive (1), les textes du soviétique Alexandre Ivanovitch Oparine (2) (1924) et du britannique John Burdon Sanderson Haldane (3) (1929) peuvent être considérés comme les propositions les plus complètes. À cinq années d'intervalle, ils formulent indépendamment deux propositions matérialistes de modèles présentant les étapes de l'apparition de la vie sur la Terre. Chacun d'eux intègre des données d'origines variées, ayant trait à l'évolution de notre planète et aux transformations de la matière qui auraient permis le passage de la matière minérale à la matière organique, pour aboutir finalement aux premières formes de vie. Ainsi se côtoient la planétologie, la géochimie, la chimie minérale, la chimie organique et la biologie, avec cette démarche Oparine et Haldane inaugurent une tradition qui sera largement poursuivie au cours du XX^e siècle, et dans laquelle les apports de différentes disciplines sont rapprochés.

Oparine, Haldane...

En 1936, Oparine (4) publie un ouvrage dans lequel il approfondit son modèle. Traduit en anglais en 1938, ce livre trouve un public large. Durant la même décennie, le physicien et astronome français, Alexandre Dauvillier, aborde lui aussi le thème des origines et publie une série d'études conséquentes sur la question. Dans ces travaux une place importante est donnée aux diverses disciplines déjà citées : la pluridisciplinarité s'impose dès lors comme une nécessité.

... Dauvillier...

-
- (1) MAUREL, M.-C. & TIRARD, S. (1999). Les origines de la vie. In D., Lecourt, (Éd.), *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences* (pp. 711-713). Paris : Presses Universitaires de France.
- (2) OPARIN, A.I. (1924). The Origin of life. Trad. Ann Synge, in J.D., Bernal, (Ed.), (1967). *The Origin of Life* (pp. 199-234). London : Weindenfeld and Nicholson.
- Dans ce texte, Oparine présente un modèle d'évolution du globe. Après une description des conditions régnant sur la Terre primitive, il présente des synthèses spontanées de substances organiques à partir de la matière minérale. Ensuite, dans la mer primitive, les molécules ainsi formées constituent des unités hétérotrophes évoquant les cellules primitives.
- (3) HALDANE, J.B.S. (1929). The origin of Life. In J.D., Bernal, (Ed.), (1967). *The Origin of Life* (pp. 242-249). London : Weindenfeld and Nicholson.
- Se fondant sur des résultats expérimentaux dus à Baly, et montrant que la lumière ultraviolette en agissant sur un mélange d'eau et de dioxyde de carbone engendre la formation d'un grand nombre de substances organiques, Haldane propose qu'un processus analogue ait pu avoir lieu dans les conditions de la terre primitive. Soulignons que selon lui l'atmosphère primitive contenait du dioxyde de carbone, et pas d'oxygène moléculaire.
- (4) OPARIN, A.I. (1938). *The origin of life*. New York : The Mc Millan Company.

... Bernal

À la fin des années 40, John Desmond Bernal (5) ne déroge pas à cette tendance. Il établit notamment un bilan critique des travaux antérieurs et en propose une synthèse avec ses propres idées. Ses hypothèses intègrent des données d'origines variées et comprennent, par exemple, des éléments de physique, de minéralogie, de chimie, de biophysique ou de biochimie... Une des idées originales de Bernal concerne le rôle des argiles qui ont pu constituer un support mécanique et catalytique, responsable de la constitution de molécules organiques polymériques.

un demi-siècle
d'hypothèses

La première moitié du siècle correspond donc à une période de formulation et de consolidation des hypothèses. Tous les apports de la science moderne qui peuvent être utiles à ces auteurs sont rapprochés et entrent dans la construction d'énoncés complexes qui se présentent comme des scénarios retraçant les événements primordiaux ayant conduit à la vie. Les recherches ultérieures ne démentiront pas cette tendance vers une méthode productrice de formulations théoriques regroupant des données très variées. Cependant, les modalités de ces rapprochements vont évoluer en fonction du contenu des données elles-mêmes.

les premières
expérimentations

Au début des années 50, Melvin Calvin et Harold Urey inaugurent indépendamment l'ère de l'expérimentation qui rapidement donnera naissance à une nouvelle discipline : la chimie prébiotique. Malgré certaines divergences qu'il conviendra de souligner, tous deux établissent, à partir de données de planétologie comparée, la composition de mélanges minéraux représentant des milieux primitifs au sein desquels il est possible de déclencher des réactions productrices de molécules organiques. Calvin utilise pour ceci les résultats des travaux de Wendell M. Latimer (6), de son côté Urey utilise essentiellement ses propres résultats.

La première expérience remarquable est menée aux États-Unis, en 1951, par Calvin et ses collaborateurs (7). Il soumet une solution aqueuse de dioxyde de carbone à des radiations ionisantes et observe qu'une partie du dioxyde de carbone a été réduite en formaldéhyde.

Un an plus tard, Urey rejette ouvertement ce premier résultat (8). Il considère, en effet, que le mélange initial utilisé par Calvin n'est pas assez réducteur, ce, en raison de la

-
- (5) BERNAL, J.D. (1951). *The Physical Basis of Life*. London : Routledge and Kegan Paul. Cet ouvrage est la reprise d'une conférence donnée en 1947.
- (6) LATIMER, W.M. (1950). Astrochemical Problem in the Formation of the Earth. *Science*, 112, 101.
- (7) GARISSON, W.M., MORRISSON, D.C., HAMILTON, J.C., BENSON, A.A. & CALVIN, M. (1951). Reduction of carbone dioxyde in aqueous solutions by ionizing radiations. *Science*, 114, 416-418.
- (8) UREY, H. (1952). On the Early Chemical History of the Earth on the Origin of Life. *Proc. Natl. Acad. Sc. U.S.*, 38, 351-363.

Urey impose la nature réductrice des conditions primitives

présence du dioxyde de carbone. Urey soutient, pour sa part, que le milieu primitif ne pouvait pas contenir cette molécule. Il rappelle qu'Oparine avait affirmé la même chose en 1936. En confirmant le recours au caractère réducteur des conditions primitives, Urey détermine fondamentalement le déroulement de la recherche dans le domaine de l'origine de la vie. Dans ce même texte, il lance en fait lui-même l'expérimentation, dans les conditions qu'il préconise, en affirmant : *"l'expérimentation sur la production de composés organiques à partir d'eau et de méthane en présence de lumière ultraviolette d'une distribution spectrale estimée approximativement à celle du soleil pourrait être des plus profitables. La recherche des possibles effets des décharges électriques sur les réactions pourrait aussi être tentée puisque des éclairs électriques peuvent être raisonnablement imaginés dans une atmosphère réductrice."*

la chimie prébiotique est bien née

Moins d'un an plus tard c'est chose faite. Un jeune chimiste américain, Stanley Miller, élève d'Urey publie dans la très prestigieuse revue américaine, *Science*, un article intitulé : *"Une production d'acides aminés dans les conditions possibles de la Terre primitive"*. Durant une semaine, un mélange de méthane, d'ammoniac, d'hydrogène et d'eau est exposé à des décharges électriques et la synthèse d'acides aminés (de la glycine, de l' α -alanine et de la β -alanine) est mise en évidence.

Avec cette publication, l'étude des origines de la vie entre officiellement dans le champ de l'expérimentation. Dès lors de nombreux auteurs suivent la voie ouverte par Urey et Miller : la chimie prébiotique est bien née. Les résultats obtenus conduisent rapidement à un consensus assez large quant au processus de l'apparition de la vie sur la Terre. Il apparaît que les expériences tentées mettent en jeu des mélanges initiaux réducteurs, comme l'atmosphère qu'ils représentent, et dont le dioxyde de carbone doit être strictement absent. Cette dernière contrainte s'imposera à toute la réflexion sur les origines de la vie durant environ trois décennies.

un modèle en trois phases

Le modèle progressivement construit et le plus généralement admis durant cette période peut se résumer selon les trois phases suivantes :

- Une source d'énergie, chaleur ou divers rayonnements, en agissant sur un milieu primitif minéral et réducteur provoque la synthèse de certaines molécules organiques simples, sucres, acides aminés, bases azotées.
- Dans la *soupe primordiale* ou *prébiotique*, les molécules précédentes s'associent entre elles pour constituer les macromolécules qui caractérisent le vivant : les protéines et les acides nucléiques.
- Enfin, dans un troisième temps, les cellules primitives s'isolent et forment les êtres vivants primordiaux.

Progressivement chacune de ces étapes s'est vue illustrée par des résultats expérimentaux obtenus dans les conditions prébiotiques. Ainsi par exemple :

– Les synthèses d'acides aminés et de sucres sont suivies par des synthèses de bases azotées, en 1960, Juan Oro synthétise de l'adénine.

– En 1958, Fox et Harada réussissent la polymérisation thermique des acides aminés et obtiennent ce qu'ils nomment des protéinoïdes.

– En 1965, Fox montre que ces protéinoïdes peuvent constituer des microsphères qui ne sont pas sans évoquer des cellules primitives.

Cette présentation rapide des étapes des recherches sur les origines de la vie confirme que toute théorie sur cette question incorpore un ensemble de données émanant de champs disciplinaires très distincts. Les modèles constitués comportent une partie fondamentale constituée par une hypothèse quant à la composition du milieu primitif, la planétologie comparée et la géochimie étant les deux principales disciplines à l'origine de cette phase. Une fois les conditions fixées, des synthèses chimiques sont réalisées qui dépassent rapidement le domaine des molécules simples pour s'attaquer à celui des polymères caractéristiques du vivant. Il conviendra donc d'analyser selon quelles modalités des champs aussi éloignés, mettant en jeu des corpus théoriques et des méthodes aussi distinctes, peuvent être associés.

1.2. La dynamique du modèle de la soupe prébiotique et le rapprochement de disciplines

Au sein des modèles sur les origines de la vie deux questionnements sont donc réunis. Le premier est l'étude des conditions régnant sur le globe lorsque la vie y est apparue, le second consiste en une recherche sur la ou les voies suivies par l'évolution chimique. Du milieu des années 50 aux années 70, l'existence d'un milieu primitif réducteur fut admise comme un dogme. Dans ce contexte, il est intéressant de rechercher les justifications de certains rapprochements de données qui permirent la construction et la rectification du modèle de la soupe prébiotique.

• Origines de la vie et biologie moléculaire

Il est remarquable que la chimie prébiotique, champ expérimental nouveau, ait été progressivement guidée par les résultats de la biologie moléculaire. La confrontation des chronologies des principaux événements qui ont marqué les deux domaines permet de rendre compte de cette influence.

Dans les années 50, la chimie prébiotique s'intéresse aux synthèses d'acides aminés. C'est la biologie moléculaire, et les principes qu'elle dicte alors, qui élargissent le champ de recherche vers les bases azotées. En effet, en 1958, Francis Crick énonce le dogme central de la biologie moléculaire selon lequel l'ADN se voit investi d'une position fondamentale, et c'est en 1960 qu'Oro réalise la synthèse de l'adénine, après que Beadle eut suggéré que la première molécule répliquative

la biologie
moléculaire
influence
la chimie
prébiotique

devenait être une molécule simple constituée d'une répétition de thymine et d'adénine. De la même manière, c'est en 1986 que Gilbert imagine un monde primordial dans lequel l'ARN se voit conférer le premier rôle : ce fait intervient après la révision du dogme central, imposée par la découverte de la transcriptase inverse en 1970, et après la mise en évidence des propriétés autocatalytiques de l'ARN au début des années 80. Cette concordance révèle qu'il existe des liens épistémologiques entre l'étude des origines de la vie et la biologie moléculaire. Ceux-ci reposent en fait sur une opposition méthodologique créatrice d'une complémentarité heuristique. La biologie moléculaire déconstruit la structure vivante pour en comprendre le fonctionnement. Les résultats qu'elle obtient deviennent des buts à atteindre pour les expérimentateurs de la chimie prébiotique. Cette dernière est, pour sa part, reconstructrice, et trouve une partie de sa justification dans le fait que la nature actuelle contient des molécules fondamentales qu'elle s'avère capable de fabriquer.

• *Origines de la vie et traces*

Le domaine des origines de la vie a été également abordé grâce aux méthodes de la micropaléontologie. Les scientifiques qui pratiquent cette discipline, lorsqu'ils s'intéressent à l'origine de la vie, recherchent dans les roches anciennes des traces fossiles des premières cellules. Sur un plan épistémologique il convient d'accorder à ces fossiles une place centrale. Ils représentent les archives tangibles de cette recherche historique que constitue l'étude des origines de la vie. Ce sont des preuves effectives de l'état des formes vivantes à une époque donnée. Une fois mis en évidence les fossiles deviennent, pour les expérimentateurs de la chimie prébiotique et pour les concepteurs des théories, des jalons incontournables.

Une analyse analogue peut être menée quant aux apports de certaines données géologiques. Les roches contiennent en effet des traces qui témoignent d'une évolution de l'atmosphère : de telles archives participent, elles aussi, à jalonner les processus décrits.

Deux approches sont donc associées dans la genèse des modèles. D'une part, celle des chimistes prébioticiens qui veulent reconstituer et comprendre et, d'autre part, celle des naturalistes qui veulent voir. Les origines de la vie constituent un problème historique autour duquel s'assemblent deux types de données. Les premières sont issues d'une démarche reconstructrice, et les secondes d'une investigation de type archivistique. Cette complémentarité permet de formuler un récit plausible de l'histoire de l'apparition de la vie constituent la Terre, dans le strict respect des archives paléontologiques et géochimiques.

la micro-
paléontologie
et la géochimie
posent des
jalons pour les
prébioticiens

1.3. Une communauté symbole de la pluridisciplinarité

L'étude des modalités de la publication des résultats et de la coordination de la recherche peut participer à l'illustration des rapprochements disciplinaires qui caractérisent le domaine des origines de la vie.

Dès les années 50, alors que la chimie prébiotique entame son développement, la communauté internationale se structure. Des réunions internationales ont lieu régulièrement. Le premier rendez-vous majeur se déroule en 1957, sous la forme d'un symposium organisé à Moscou, sous l'égide de l'Académie des Sciences d'URSS (9). À titre d'exemple, il est possible d'en analyser quelques aspects. La variété des thèmes abordés répond à la pluridisciplinarité nécessaire à l'établissement de la théorie dans le domaine des origines de la vie.

Tous les pionniers de la chimie prébiotique sont présents pour soutenir leurs propres résultats ou présenter des bilans. Urey (10), par exemple, traite de la nature de l'atmosphère primitive et consolide son hypothèse des conditions primitives réductrices. Son intervention est prolongée par celle de Miller qui présente un bilan des résultats obtenus durant les dernières années en chimie prébiotique. Fox (11) étudie l'étape de l'évolution chimique qui conduit aux cellules primitives. Son propos souligne nettement l'apport essentiel que constituent les données de biochimie et de biologie moléculaire dans l'édification de tels modèles sur les origines de la vie. Notons aussi la présence de Linus Pauling à ce symposium. Prix Nobel de Chimie en 1954, pour ses travaux sur les liaisons chimiques, il présente à Moscou une communication sur la nature des forces agissant dans les processus de duplication des molécules chez les êtres vivants (12). Pauling, par sa spécialité, enrichit la réflexion, mais il apporte surtout sa caution aux aspects physico-chimiques des raisonnements des biochimistes. En chimiste, il se charge d'analyser la notion de duplication que les biochimistes pourront utiliser de manière courante sans avoir à en justifier les

Symposium de
Moscou en 1957

des savants
d'origines
diverses :
un regroupement
de compétences

-
- (9) FLORKIN, M. (Ed.) (1960). *Aspects of the origin of life, Symposium on the Origin of Life on the Earth, Moscow, 1957*. Oxford, London, N.Y., Paris : Pergamon Press.
- (10) UREY, H.C. (1960). Primitive planetary atmospheres and origin of life. In M., Florkin, (Ed.). *Op.cit.* (pp. 8-14).
- (11) FOX, S. (1960). A chemical theory of spontaneous generation. In M., Florkin, (Ed.). *Op.cit.* (pp. 148-154).
- (12) PAULING, L. (1960). The nature of the forces operating in the process of the duplication of molecules in living organisms. In M., Florkin, (Ed.). *Op.cit.* (pp. 132-140).

mécanismes intimes (13). Dans ce cas s'instaure donc un rapprochement des disciplines par inclusion implicite des données de l'une dans l'édification de l'autre.

La pluridisciplinarité est donc fondamentale pour que l'objectif d'un tel congrès soit atteint. Chaque scientifique présent apporte, dans sa spécialité, des données qui, si elles sont admises par les autres participeront, à l'édification d'un modèle général. Les nombreux congrès qui ont eu lieu depuis ont prolongé ce type d'approche, ils ont tous représenté des lieux de confrontation et de rapprochement des idées, favorisant ainsi, comme cela sera précisé plus bas, une étape essentielle dans la formalisation d'une synthèse.

en 1968,
création
de l'ISSOL...

En 1968, une société scientifique internationale, ayant entre autres objectifs celui d'étudier les origines de la vie, est créée, il s'agit de l'I.S.S.O.L. : International Society for the Origin of Life. La naissance de cette organisation semble due à une volonté de la N.A.S.A. qui la soutient financièrement. Simultanément une revue est fondée, elle s'intitule *Space Life Sciences*. À vocation délibérément pluridisciplinaire, elle est destinée à accueillir des articles sur le thème général des sciences de la vie et de l'espace. Le sommaire du premier numéro est caractéristique : aux cotés d'un article important de Ponnamperuma et Gabel (14) constituant un bilan des recherches dans le domaine de la chimie prébiotique, on peut lire, par exemple, des articles de médecine spatiale. C'est en fait au thème général du vivant dans l'espace que cette revue s'intéresse : le but de la N.A.S.A. étant de préparer les vols habités et d'évaluer les risques de contamination de la planète par d'éventuelles formes de vie extra-terrestre (15). L'I.S.S.O.L. est très rapidement devenue l'institution dominante. Tous les quatre ans, elle organise un congrès international dont le programme se caractérise par la diversité des thèmes abordés.

... une société
savante qui
incarne la pluri-
disciplinarité

En 1974, *Space Life Sciences* devient *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*. Comme l'indique ce titre, les objectifs de cette nouvelle revue sont dès lors recentrés. Cependant, dans chaque numéro, la diversité des articles publiés rappelle que la pluridisciplinarité est une nécessité de l'étude des origines de la vie. Les sommaires en témoignent et regroupent des thèmes (16) tels que : la cosmochimie, la paléobio-

-
- (13) Cette situation est tout à fait analogue à celle décrite par Michel Morange concernant l'attitude des "biologistes moléculaires" quant à la chimie quantique.
MORANGE, M. (1986). *Une lecture du vivant*. CIACO éditeur. P. 82.
- (14) PONNAMPERUMA, C. & GABEL, N.W. (1968). Current status of chemical studies on the origin of life. *Space Life Sciences*, 1, 1, 64-96.
- (15) MANOUKIAN, G. (1968). *Space Life Science*. 1, 1.
- (16) *Origins of Life*, 5, 1/2 (1974).

logie, la chimie organique primordiale, l'organisation pré-cellulaire... En outre, ce rapprochement des spécialités se retrouve dans la composition du bureau éditorial où des astronomes, des physiciens, des chimistes, des biologistes et des paléontologistes... se côtoient.

L'I.S.S.O.L. représente donc un lieu où s'est structurée une grande partie de la production scientifique de ces dernières décennies sur les origines de la vie. Elle a été un agent essentiel dans le rapprochement des données provenant d'horizons variés. Cette institution majeure incarne la pluridisciplinarité qui caractérise le domaine qu'elle soutient.

2. LA PLURIDISCIPLINARITÉ ET LA FORMALISATION DES MODÈLES SUR LES ORIGINES DE LA VIE

2.1. Des spécialistes face à une pluridisciplinarité nécessaire

Le chercheur qui aborde la question des origines de la vie doit-il être polyvalent ? Bernal, qui, dès les années 40, a soulevé le problème de la difficulté de traiter des données d'origines variées, pense que cela est indispensable. Vers la même époque, cette spécificité est aussi exprimée par Dauvillier et Desguins (17) : *"Pour pouvoir présenter une théorie cohérente, nous avons fait appel à des disciplines scientifiques qui, à cause des nécessités de la spécialisation, s'ignorent souvent les unes les autres ; entreprise téméraire et prématurée."*

Cette dernière remarque souligne la difficulté de la tâche du scientifique dans cette situation. En effet, la formulation des modèles par un seul auteur le contraint à franchir les limites de sa discipline initiale. C'est là une attitude risquée qui peut être difficile à assumer institutionnellement. Durant la première moitié du siècle, le domaine des origines de la vie n'apparaissait pas comme un champ de spécialisation. Haldane est mathématicien et biologiste, Dauvillier est astronome, Bernal est physicien, mais déjà versé dans la biologie (18). Tous trois possédaient une réputation établie dans leurs domaines respectifs et pouvaient se permettre de franchir certaines limites pour formuler des synthèses théoriques. Le cas d'Oparine est un peu différent. Son texte de 1924 est passé inaperçu dans la communauté internationale. Il poursuit alors une carrière de physiologiste végétal. Son livre de 1938 l'a imposé comme un spécialiste de la question des origines de la vie ce qui est exceptionnel à l'époque.

des auteurs
conscients
d'une pluri-
disciplinarité
nécessaire

(17) DAUVILLIER, A. & DESGUINS, E. (1942). *La genèse de la vie*. Paris : Hermann. P. 124.

(18) Dans les années 40, il participe à l'étude de la structure des protéines grâce à la technique de la diffraction des rayons X.

Ces savants ont donc tous franchi les limites de leur spécialité et assumé le risque de tenir un discours pluridisciplinaire. La démarche de ces pionniers s'est avérée heuristique et leurs hypothèses ont stimulé nombre de travaux expérimentaux à partir des années 50.

la structuration
d'une
communauté

À partir du milieu du siècle, la structuration de la communauté scientifique dans le domaine des origines de la vie a permis le rapprochement des disciplines. Chacun se charge alors d'apporter un complément ou une rectification dans son champ de compétence. Le spécialiste doit donc rechercher l'intégration de ses données dans un modèle global dont l'élaboration ne lui incombe pas. La pluridisciplinarité est inhérente à l'ensemble de la réflexion sur les origines de la vie, mais elle n'est plus une contrainte pour le chercheur. Ce dernier peut se contenter d'avoir conscience que ses recherches s'intègrent dans une dynamique plus vaste, dépendant des acquis de disciplines éloignées. En 1965, Joël de Rosnay, en conclusion de sa communication au Colloque de Paris sur la Biogenèse, insiste sur cette nature collective de l'approche du problème : *"L'Origine de la vie apparaît comme de plus en plus liée à l'évolution sidérale, géochimique et géologique des planètes et de la Terre en particulier. Les progrès qui seront accomplis au cours des prochaines années par les chimistes et les biologistes seront très probablement en relation étroite avec ceux réalisés dans le domaine de l'astrophysique ou de la paléo-géochimie."* (19)

différentes
spécialisations
sont apparues

La nécessité de la pluridisciplinarité ne s'est donc pas démentie depuis le début du siècle dans le domaine des origines de la vie, son application a évolué avec le développement des recherches et l'approfondissement des modèles. Différentes spécialisations sont apparues et concernent l'élucidation d'étapes précises de l'évolution de la matière vers la vie. C'est ainsi que des auteurs comme Miller, Fox ou Oro se sont illustrés particulièrement par certaines synthèses. Oparine lui-même est progressivement apparu comme un spécialiste des coacervats (20) et du métabolisme primitif (21). Ainsi, la spécialisation a permis un développement et un approfondissement des différentes étapes du modèle. Une

(19) ROSNAY, J. de, (1967). Synthèses de molécules d'intérêt biologique par simulation des conditions de l'environnement primitif. In A., Thomas, (Éd.). *Biogenèse* (pp. 180-225). Paris : Masson.

(20) La notion de coacervation a été formulée au début des années 30 par le belge Bungenberg de Jong. Dans les solutions colloïdales ce phénomène est responsable de la formation de structures microscopiques à deux épaisseurs. Au centre, se trouve "le coacervat", constitué par une masse fluide riche en substances colloïdales. Il est entouré par "le liquide équilibré", couche de solution dépourvue de colloïdes, mais en équilibre avec les molécules périphériques du coacervat. Oparine a consacré de nombreux travaux expérimentaux aux coacervats, les considérant comme un modèle analogique des cellules primordiales.

(21) Les distances qu'il prit volontairement avec la génétique ne furent pas étrangères à son intérêt exclusif pour une approche métabolique.

synthèse de l'ensemble de ses apports doit donc être effectuée. Se pose alors la question des auteurs et des modalités de la formalisation d'une théorie complète.

2.2. Formulation et diffusion des modèles synthétiques

L'importance des congrès a déjà été soulignée. L'issue de ces réunions se concrétise généralement par une publication collective. Celle-ci se présente comme un ensemble de données émanant de disciplines et d'approches méthodologiques différentes et c'est au lecteur de réaliser une synthèse globale. Ce sont les chercheurs eux-mêmes, spécialistes du domaine des origines de la vie, qui sont les principaux lecteurs de ces publications. Une synthèse des données leur est utile, mais ils peuvent se contenter d'une modélisation personnelle et informelle qui leur permet de situer leurs travaux dans un contexte plus général, sans pour autant chercher à imposer un récit global des événements. Individuellement chacun d'entre eux est donc consigné dans le champ de sa spécialité, en sortir serait prendre le risque de voir sa compétence contestée. La formulation d'un modèle complet présente un risque institutionnel qu'un chercheur n'est pas toujours prêt à assumer.

Depuis 1950, les synthèses de haut niveau ont été offertes par des spécialistes du domaine des origines de la vie, elles ne sont pas si nombreuses. Cette rareté, qui s'explique sans aucun doute par l'importance du risque qui vient d'être décrit, a contribué à leur donner d'autant plus d'impact.

Le plus souvent ce sont des personnalités de renom qui ont tenté cet exercice. C'est ainsi que nous retrouvons les noms d'Oparine, Haldane, Bernal, Urey ou Calvin... Ils interviennent dans des articles de synthèse (Bernal (22), Miller et Urey (23)...) ou dans des livres dont plusieurs ont fait date. Il est nécessaire d'insister sur l'importance de ces ouvrages (24) dans la diffusion des modèles. Citons, par exemple,

formuler
un modèle sur
les origines de
la vie : franchir
les limites des
disciplines

-
- (22) BERNAL, J.D. (1960). The problem of stages of Biopoiesis. In M., Florin, (Ed.), *Op. cit.* (note 9) (pp. 30-45).
- (23) MILLER, S. & UREY, H.C. (1959). Organic compounds synthesis on the primitive earth. *Science*, 130, 245-251.
- (24) Il peut être utile de rappeler qu'il existe une problématique du lieu de ce qu'Henri Atlan appelle la théorisation en biologie. Pour lui "ce qui joue le rôle de la théorisation en biologie, c'est le *text-book*, le manuel". C'est là qu'est réuni "dans une même image abstraite, dans un schéma, un modèle, ce qui provient d'observations au départ différentes parce que produites par des techniques différentes". Cette remarque intéresse particulièrement le didacticien. Une de ses tâches consiste, en effet, en un repérage des sources des concepts et notions enseignés et en l'étude de l'évolution de leur formulation. Le constat d'Atlan révèle donc que l'ouvrage de niveau universitaire possède une double fonction, il est un vecteur d'une information scientifique, tout en étant le lieu où celle-ci se structure en une formulation originale. La question des origines n'échappe évidemment pas à cette problématique très générale de la théorisation. ATLAN, H. (1999). *La fin du "tout génétique". Vers de nouveaux paradigmes en biologie*. Paris : INRA éditions. P. 85.

des ouvrages
fédérateurs

ceux d'Oparine (1965) (25), de Dauvillier (26) ou de Calvin (27). C'est dans ces deux types d'écrits que les différentes données sont effectivement rapprochées de manière à constituer un tout cohérent. Les auteurs disposent alors de toute la latitude pour les discuter et proposer les articulations indispensables à l'assemblage d'un modèle pluridisciplinaire. Comme cela a déjà été signalé, la plus fondamentale de ces articulations concerne le rapprochement entre les conditions du milieu primitif déduites de données de planétologie et de géochimie, avec celles de la chimie prébiotique. Ces ouvrages ont proposé de grandes synthèses théoriques qui ont participé à fédérer un consensus autour du modèle de la soupe prébiotique durant trois décennies. On peut leur attribuer une double fonction. D'une part, ils rassemblent les données en une théorie globale des origines de la vie – tout en privilégiant naturellement la sensibilité de l'auteur quant aux options possibles –, d'autre part, ils participent à la diffusion des données, ainsi qu'à celle du modèle constitué, et ce, en dehors de la communauté des spécialistes. L'enseignement du modèle s'avère dès lors possible, au moins au niveau universitaire.

des ouvrages
de vulgarisation
aussi

Enfin, il ne faut pas négliger l'influence de certains ouvrages de vulgarisation. Il semble que ce type d'ouvrage soit apparu après que le modèle de la soupe prébiotique s'est imposé dans la communauté des spécialistes. Certains d'entre eux en ont d'ailleurs signé, par exemple Bernal (28), de Rosnay (29) ou Ponnamperuma (30). Mais le sujet a aussi souvent été traité par des scientifiques non spécialistes de la question. L'objectif pouvant être alors d'intégrer le modèle dans une réflexion plus générale sur le vivant, ce fut le cas de l'ouvrage d'Ernest Kahane, *La vie n'existe pas !* (31).

Les ouvrages de vulgarisation ont été des outils efficaces de diffusion du modèle. La nature pluridisciplinaire des modèles y reste réelle, mais, ces publications n'ayant pas une vocation critique, la complexité due à l'hétérogénéité des données est effacée, au profit d'une présentation simplifiée et idéalisée.

(25) OPARINE, A.I. (1965). *L'origine de la vie sur la Terre*. Paris : Masson.

(26) DAUVILLIER, A. (1958). *L'origine photochimique de la vie*. Paris : Masson.

(27) CALVIN, M. (1969). *Chemical evolution : Molecules evolution towards the origin of living systems on the earth and elsewhere*. Oxford : Clarendon.

(28) BERNAL, J.D. (1972). *L'origine de la vie*. Lausanne : Éditions Rencontre.

(29) ROSNAY, J. de (1966). *Les origines de la vie de l'atome à la cellule*. Paris : Le Seuil.

(30) PONNAMPERUMA, C. (1972). *The Origins of Life*. London : Thames and Hudson.

(31) KAHANE, E. (1962). *La vie n'existe pas !* Paris : Les Éditions de l'Union Rationaliste.

2.3. Chaque modèle constitue un tout masquant la pluridisciplinarité

la nature réductrice du milieu primitif : clef de voûte du modèle

À partir des années 50, le modèle de la soupe prébiotique s'est imposé comme un tout cohérent et a été admis par nombre de scientifiques. Durant plusieurs décennies le dogme de la nature réductrice de l'atmosphère prébiotique a conditionné de manière hégémonique les choix expérimentaux de la chimie prébiotique. Il y avait là une fragilité ignorée de l'ensemble de l'édifice. La proposition sur la nature de l'atmosphère primitive conditionnait en fait le caractère plausible de l'ensemble du récit évolutif.

remise en cause au début des années 80

Au début des années 80, des données de géochimie ont abouti à la remise en question de la nature réductrice du milieu prébiotique (32). Le dioxyde de carbone est dès lors apparu comme un constituant non négligeable de l'atmosphère primitive. Cette nouvelle conception oblige à une révision de l'ensemble de l'édifice théorique pluridisciplinaire. Si les résultats issus de la chimie prébiotique ont conservé leur intérêt, c'est seulement après un changement considérable de leur contexte d'interprétation.

Cette nouvelle situation a permis de revaloriser des idées plus anciennes et jusque-là un peu marginales, ce fut le cas, par exemple, de la théorie de Cairns-Smith (33) qui insiste sur le rôle des argiles et sur la "relève génétique" (34). De nouvelles propositions, comme celle de Wachtershäuser (35) concernant le métabolisme de surface, avec notamment le rôle de la pyrite, ont pu voir le jour. Toutes ces données, anciennes et récentes, sont en fait actuellement à la recherche de nouvelles articulations qui, une fois établies, permettront de proposer de nouveaux processus et un modèle complet. C'est cet ensemble complexe et non stabilisé qui constitue l'objet de notre enseignement.

(32) PINTO, J.P., GLADSTONE, G.R. & YUNG, Y.L. (1980). Photochemical production of formaldehyde in the earth's primitive atmosphere. *Science*, 210, 183-185.

(33) CAIRNS-SMITH, A.G. (1990). *L'énigme de la vie, Une enquête scientifique*. Paris : Éditions Odile Jacob.
CAIRNS-SMITH, A.G. (1966). The Origin of Life and the Nature of the Primitive Gene. *Journal of Theoretical Biology*, 10, 53-88.

(34) Selon Cairns-Smith, au cours de l'évolution des premières formes de vie, le support matériel de l'information génétique aurait pu changer une ou plusieurs fois.

(35) WACHTERSÄUSER, G. (1988). Before enzymes and templates : theory of surface metabolism. *Microbiological review*, 52, 452-484.

3. LA PRÉSENTATION DIDACTIQUE DU MODÈLE ET SA NATURE PLURIDISCIPLINAIRE

3.1. La pluridisciplinarité est reconnue par les programmes et instructions officiels

Dans les programmes de la classe de Terminale S, en vigueur actuellement, la nécessité d'une approche pluridisciplinaire apparaît de manière évidente et découle naturellement de la conception de l'ensemble de la partie intitulée : *"Histoire et évolution de la Terre et des êtres vivants"* (36).

Les activités envisagées illustrent parfaitement cette diversité :

"Étude, sur documents, de la composition des gaz dans les nébuleuses, des poussières planétaires, des molécules organiques des météorites.

Analyse des expériences de Miller, Oparine...

Observation de stromatolithes sur lames minces et/ou sur documents.

Étude, sur les documents, de gisements archéens, choisis en fonction de leur intérêt dans la reconstitution de l'atmosphère et de la vie primitives..."

La démarche pluridisciplinaire est encore soulignée par le document d'accompagnement qui précise que *"c'est dans le cadre géologique qu'est située l'étude chronologique de l'apparition et de la diversification de la biosphère."* Enfin, notons que le programme insiste, avec raison, sur la nécessité d'étudier *"la liaison entre l'évolution des êtres vivants et celle de l'atmosphère"*.

Le sujet est donc éminemment pluridisciplinaire. Mais, le travail du professeur ne pourra se limiter à guider ses élèves simplement d'un domaine à l'autre, dans l'espoir que des liens se noueront spontanément. Il est en effet impossible de formuler facilement un modèle, certaines difficultés ne peuvent être contournées et une attitude critique est nécessaire. Celle-ci se traduit dans le programme par les termes suivants : *"Le mécanisme du passage de ces molécules à la cellule est encore très problématique."* Dans le document d'accompagnement il est précisé qu'il convient d'éviter *"les spéculations sur l'origine des premières molécules semblables à celles de la vie"* (37). Il est en outre précisé dans quelles limites il faut interpréter les expériences de Miller, celles-ci ne servant qu'à montrer qu'il est possible d'effectuer des expériences de chimie prébiotique.

en Terminale,
des
programmes
et des objectifs
pluridisciplinaires

(36) Ministère de l'Éducation Nationale (Éd.) (Réédition 1995). *Sciences de la vie et de la Terre, Classes de seconde, première et terminale*. Paris : CNDP. Pp. 72-73.

(37) Document d'accompagnement, p. 27.

une place
pour l'histoire
des sciences

Concernant ce dernier point, nous voyons la place que devront occuper les données d'histoire des sciences. Le professeur devra comprendre qu'il convient de replacer les premières expériences de chimie prébiotique dans le contexte historique qui leur conférait leur validité, c'est-à-dire en association avec l'hypothèse de l'atmosphère réductrice et un milieu prébiotique exempt de dioxyde de carbone.

Il apparaît donc que, dans les lignes de ce programme et dans les instructions, nous retrouvons une nouvelle fois l'articulation entre les domaines qui permettent de définir les conditions primitives, et la chimie prébiotique qui tente de décrire les premières étapes. C'est précisément, parmi d'autres, cette relation très délicate que les élèves devront s'efforcer de maîtriser pour réussir certaines épreuves du baccalauréat qui en appellent l'analyse.

une première
approche en 4^e

Enfin, soulignons que les nouveaux programmes de la classe de Quatrième, dans la partie intitulée "*Histoire de la vie, histoire de la Terre*", s'attachent à montrer, à l'image des programmes de Terminale, "*qu'il existe des interdépendances entre l'histoire de la vie et l'histoire de la Terre*" (38). Dans cet esprit, nous retrouvons dans les contenus et notions, l'articulation entre les conditions de milieu et la formation de la vie : "*La Terre s'est formée il y a environ 4,5 milliards d'années. Les premières étapes de son évolution – diminution de la température de sa surface, formation des premières étendues d'eau – ont permis l'apparition de la vie, environ un milliard d'années plus tard.*" Dès la classe de Quatrième les élèves doivent donc être capables de rapprocher des données et d'étudier "*sur un exemple, une relation entre des événements survenus à la surface de la Terre et des changements dans le monde vivant*".

3.2. Enseigner les théories sur les origines de la vie : révéler une construction et construire

Un modèle concernant les origines de la vie est donc une construction issue de nombreux champs disciplinaires. Dans la réalité des études sur les origines de la vie, un modèle est un ensemble complexe, résultat d'un travail de synthèse critique effectué par la communauté scientifique sur une longue durée. En classe de Terminale, sans prétendre à la redécouverte, l'enseignement d'un tel modèle se fixe comme objectif l'exploitation de données permettant de le reconstruire. La tâche de l'élève consiste à analyser ces données, à les relier entre elles, et finalement à formuler une proposition présentant les étapes d'un processus d'apparition de la vie.

(38) Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, Direction des Lycées et Collèges (Éd.) (Réédition 1997). *Programme du cycle central 5^e et 4^e, livret 1*. Paris : CNDP. P. 69.

Le modèle obtenu aura les vertus soulignées par Jean-Pierre Astolfi et Michel Develay (39), il facilitera “*la représentation du caché*” et aidera “*à penser le complexe*”. Dans le cas qui nous intéresse, le *caché* est dû au fait que le processus étudié est définitivement révolu et non reproductible, le *complexe* est la conséquence de la nature variée et de la multiplicité des données.

Le modèle didactique qui se structure au cours de l'apprentissage constitue un savoir. Dans le cas précis de l'étude des origines de la vie, “*ce double caractère hypothétique et systémique*” (40) signalé plus haut repose sur la pluridisciplinarité qui n'est pas sans engendrer certaines contraintes :

- Il est nécessaire de faire reconnaître les diverses méthodologies mises en œuvre dans la production des données exploitées en classe.

la pluridiscipli-
narité impose
des contraintes
didactiques

- Les élèves doivent apprendre à distinguer le statut épistémologique des résultats expérimentaux de la chimie prébiotique de celui des archives fossiles ou traces géologiques, qui ont valeur d'archives historiques.

- Chaque fait nouveau, malgré son origine distincte, doit être articulé avec les autres.

- Une présentation exhaustive de l'ensemble des données nécessaires est impossible.

À l'issue d'un tel travail, l'élève est en présence d'un modèle didactique qui ne constitue pas une reconstruction exacte d'un modèle proposé par des spécialistes. Il s'agit bien d'une construction originale, plus limitée et fondée sur un choix plus restreint de données, mais produite grâce à une méthode analogue à celle régissant la réalité scientifique. Pour l'enseignant, les modèles des spécialistes sont des objectifs, mais la multiplicité et le contenu des données à dominer pour les construire sont à l'origine d'une complexité qui les rend difficiles à atteindre.

Le savoir constitué par les modèles obtenus en classe est donc le fruit d'une transposition didactique qui pourra, si on n'y prend garde, engendrer une part de dogmatisme. Celui-ci sera cependant limité si la construction d'un tel modèle est associée à une démarche critique qui permet d'en montrer les limites et ainsi de le maintenir sous “*surveillance épistémologique*” (41).

(39) ASTOLFI, J.-P. & DEVELAY, M. (1989). *La didactique des sciences*. Paris : Presses Universitaires de France. P. 94.

D'après : MARTINAND, J.-L. (1987). Modèles et simulation : en guise d'introduction. In A., Giordan, J.-L., Martinand, (Éds.). *Actes des IX^{es} JIES* (pp. 33-43). Paris : DIRES – Université Paris VII.

(40) *Ibid.* (p. 95).

(41) ASTOLFI, J.-P., DAROT, E., GINSBURGER-VOGEL, Y. & TOUSSAINT, J. (1997). *Mots-clés de la didactique des sciences. Repères, définitions, bibliographies*. Paris-Bruxelles : de Boeck. P. 181.

3.3. Et le temps dans tout ça ?

Avant de conclure, il n'est sans doute pas inutile d'insister sur le caractère historique du problème des origines de la vie. Cette spécificité n'est pas sans conséquence sur la démarche scientifique mise en œuvre et sur l'identité épistémologique des théories obtenues.

L'apparition de la vie est un processus passé qui s'est déroulé dans une époque lointaine de l'histoire de la Terre, il n'est accessible à aucune investigation directe. Son étude scientifique consiste comme nous l'avons vu en un ensemble de reconstitutions expérimentales et théoriques, associées avec des études d'archives paléontologiques et géologiques. Ces investigations et la construction des théories reposent en partie sur des prémices fondamentales concernant la nature des conditions régnant dans le milieu primitif. Sur ce point le rapprochement des disciplines constitue une articulation cruciale.

Confrontées aux critères de scientificité de Popper, les théories sur les origines de la vie s'avèrent non falsifiables. Le caractère historique du processus de l'apparition de la vie place le scientifique dans une situation où les critères de validité sont... originaux. L'investigation par des moyens scientifiques est la seule justifiable et la rigueur des résultats obtenus est incontestable, cependant la nature historique du problème interdit tout test valable.

Si l'on admet donc le fait que la science s'intéresse à un objet historique lorsqu'elle s'intéresse aux origines de la vie, on peut alors admettre aussi que les énoncés reconstituteurs qu'elle propose sont des récits historiques. Au demeurant, si le scientifique fait œuvre d'historien en étudiant les origines de la vie, cette tâche s'avère délicate. Il doit en effet l'effectuer avec un minimum d'archives, les fossiles sont beaucoup plus rares pour cette période précoce que pour l'évolution ultérieure. La situation devient donc doublement paradoxale, la science propose des reconstitutions qu'elle ne peut prouver absolument et l'approche historique manque d'archives.

Il n'en reste pas moins que des propositions existent de manière légitime, car si le problème des origines de la vie est éminemment historique, seule la science peut tenter de le résoudre. Cette situation épistémologique semble relativement exceptionnelle; l'étude des origines de la vie est un cas particulier au sein de la recherche scientifique sur le vivant. Elle produit des énoncés ayant un statut hybride entre la théorie et le récit, on pourrait les qualifier de "théories-récits" (42).

les origines
de la vie,
un thème
historique

le scientifique
se fait historien

(42) TIRARD, S. (1996). *Les travaux sur l'origine de la vie de la fin du XIX^e siècle jusqu'aux années 1970*. Thèse, Université Paris 7.

TIRARD, S. (Sous presse). Origine et cause : les origines de la vie. In G., Rumelhard, (Éd.). *Les formes de la causalité en biologie*. Paris : INRP.

Face à ce sujet l'élève n'est pas seulement confronté à une diversité de données et de méthodes, mais à des objets aux statuts épistémologiques différents, ce qui est plus original. La grande difficulté réside dans le fait qu'il doit comprendre qu'il s'occupe d'une question historique et que l'expérience sert à la fois à tester les possibles, mais aussi à proposer des reconstitutions des étapes d'un processus

CONCLUSION

La formulation d'une théorie complète sur les origines de la vie nécessite des rapprochements de disciplines. Le caractère historique de ce domaine accentue cette nécessité en imposant, qu'après une définition du milieu primitif, deux méthodologies complémentaires, les recherches d'archives paléontologiques et géologiques et les expérimentations de la chimie prébiotique, soient rapprochées pour constituer des modèles valides.

Dans la réalité les théories sont le résultat d'un long travail de synthèse, continuellement associé à une analyse critique. L'élève, quant à lui, tout en réalisant une synthèse simplifiée, doit prendre conscience de toutes ses spécificités épistémologiques qui, précisément, en fixent certaines limites.

Stéphane TIRARD
Lycée Claude Bernard, Paris

Dans ces deux textes, ainsi que dans le paragraphe 3.3, l'analyse de la nature historique du problème des origines de la vie repose sur la réflexion menée par certains historiens sur leur propre discipline (a), ainsi que sur des analyses épistémologiques des sciences historiques (b). Citons notamment :
 (a) BLOCH, M. (1941). *Apologie pour l'histoire ou Métier d'historien*. Édité par E., Bloch (1993). Paris : Armand Colin.
 FURET, F. (1982). De l'histoire-récit à l'histoire problème. In *L'atelier de l'histoire*. Paris : Flammarion.
 (b) GOHAU, G. (1987). *Une histoire de la géologie*. Paris : La Découverte.
 Stephen Jay Gould s'est penché plusieurs fois sur cette question, on peut se référer notamment à :
 GOULD, S.J. (1995). La paléontologie, une fiction des origines. In UNESCO (Éd.). *Qu'est-ce qu'on ne sait pas ? Les rencontres philosophiques de l'UNESCO* (pp. 62-64). Paris : Découvertes Gallimard / UNESCO.
 MAYR, E. (1989). *Histoire de la biologie. Diversité, Évolution et hérédité*. Paris : Fayard.

LES RELATIONS BIOLOGIE/MATHÉMATIQUES INTERROGENT L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES DE LA VIE

Jean-Marc Lange

L'histoire de l'émergence des biostatistiques montre l'importance de la modélisation probabiliste dans les sciences de la vie. Cette modélisation est à la fois aide et obstacle et participe pleinement à la conceptualisation en biologie comme le montre le cas de la génétique. En permettant l'imputation causale elle est aussi un critère de scientificité comme l'est la validation expérimentale. Par contraste, son absence des programmes des Sciences de la Vie et de la Terre au collège et au lycée en France soulève des interrogations.

les relations
biologie/
mathématiques
à la fois
polémiques et
complexes...

La nature des relations existant entre la biologie et les mathématiques est à la fois polémique et complexe.

Elle interroge le didacticien parce qu'elle pose le problème des relations qu'entretiennent entre elles deux disciplines scientifiques. S'agit-il de relations hiérarchiques dans lesquelles la biologie trouverait des solutions "clés en main" dans le champ des mathématiques ou dans lesquelles la biologie chercherait à protéger son autonomie contre une science impérialiste (1) ? S'agit-il au contraire de relations interfécondes pour les deux champs disciplinaires ?

Elle interroge aussi le didacticien parce que ces relations renvoient aux paradigmes fondateurs de la biologie elle-même. Le statut des mathématiques dans le travail scientifique en général, et dans les sciences de la vie en particulier, est l'enjeu de débats mais aussi de représentations. Selon la pensée commune, les mathématiques ne sont qu'un simple outil servant à décrire et à mettre en forme de façon neutre des résultats expérimentaux. Qu'en est-il réellement et quelle place tiennent-elles dans l'enseignement des sciences de la vie ?

...sont
interrogées à
travers l'usage
et les fonctions
joués...

Nous nous proposons ici de nous interroger sur la nature de ces relations à travers l'étude de l'usage et des fonctions jouées par les statistiques et les probabilités dans le savoir biologique. Le point de vue adopté sera celui de l'histoire des sciences. Non que celle-ci soit le seul outil à la disposition du didacticien, mais elle est un moyen nous permettant de poser des repères. Cette approche sera complétée ailleurs par les moyens de l'enquête auprès de jeunes ensei-

(1) Voir sur ce thème : Stengers, I. (1997). *La guerre des sciences*. Paris : La Découverte.

... par les statistiques et les probabilités dans le savoir biologique

ce domaine bien que non exhaustif apparaît représentatif de l'ensemble des biomathématiques

l'introduction de son usage en biologie est liée à celle de son usage en médecine

gnants en formation initiale, par des analyses de manuels scolaires et celles des instructions officielles.

Le terme de probabilité renvoie à la volonté de mathématiser les jeux de hasard (2). Le terme de statistique est polysémique. Il recouvre à l'origine une méthodologie mathématique de recueil de données. Ces mathématiques sont très anciennes et remontent de fait à l'antiquité avec la volonté de recenser les populations. Elles se développeront à partir de la Révolution française du fait d'une volonté politique de mieux connaître la situation démographique, sociale et économique de la nation. Ce terme de statistique recouvre aussi une méthodologie d'analyse des données recueillies. Cette méthodologie, appelée parfois inférence statistique, se développe lentement durant le XIX^e siècle et le XX^e siècle. Elle naît progressivement par incorporation et développement de la pensée et de la méthode probabiliste, en particulier avec la naissance du concept de test d'hypothèse (3). Cette émergence aboutit dans le domaine des sciences de la vie à la formation des biostatistiques.

Ce domaine des biomathématiques n'est pas en soit représentatif de l'ensemble des biomathématiques contemporaines qui comportent également la bio-informatique et la modélisation. Cependant, il nous semble qu'il peut l'être en terme de relations parce qu'il est à la fois plus ancien et, *a priori*, accepté actuellement par l'ensemble des acteurs du savoir biologique. Pourtant son histoire est longue, parsemée de difficultés et d'avancées par ruptures, au sens que lui donne G. Bachelard. Cet historique n'a été effectué que partiellement et de façon dispersée. La synthèse que nous tentons ici a pour but de contribuer à éclairer les objectifs didactiques suivants :

- mieux cerner les rapports interdisciplinaires ;
- repérer la nature des aides et obstacles qui sont intervenus, et qui peut-être interviennent encore ;
- clarifier la signification et éclairer l'intérêt même de tout essai de quantification des sciences biologiques du point de vue scientifique et de celui de son enseignement.

L'histoire de l'introduction de l'usage des statistiques et probabilités dans le domaine des sciences de la vie est liée à celle de son usage en médecine sur la période que nous allons examiner ci-après. En effet, la constitution de la biologie comme science autonome ne s'effectue que très progressivement (R. Rey, 1994) :

- d'une part, autour de l'idée d'une sorte de physiologie générale,

(2) Cette volonté fut initiée par Pascal et le chevalier Méré.

(3) D. Schwartz propose ainsi de distinguer "les statistiques" de "la Statistique" née de l'union des statistiques et des probabilités.

- d'autre part, par la recherche d'un niveau élémentaire commun à l'ensemble des règnes végétal et animal, l'homme y compris.

Ce double mouvement s'accompagne d'une double émancipation :

- émancipation avec l'histoire naturelle,
- émancipation avec la médecine.

De ce fait, nous ne pouvions examiner ici l'ensemble des domaines liés aux sciences de la vie. Celui de la physiologie et de la médecine, là encore en tant qu'exemple, nous servira de support.

1. ÉMERGENCE DES BIOSTATISTIQUES

1.1. Des tentatives d'émergence avant le XIX^e siècle

en 1662, le pharmacien Van Helmont propose le premier essai thérapeutique "randomisé"

En 1662, le pharmacien belge J.-B. Van Helmont propose, pour tester les nouveaux traitements qu'il a élaborés, contre les fièvres et les pleurésies, de séparer au hasard en deux groupes un nombre de deux à cinq cents patients recevant l'un ses médicaments, l'autre les traitements traditionnels. Il inaugurerait ainsi ce que nous appellerions aujourd'hui un essai thérapeutique randomisé, c'est-à-dire dont la constitution des échantillons est effectuée au hasard (M.H. Gail, 1996) Cette proposition fut rejetée par les médecins de l'époque probablement du fait d'une conception de la médecine très centrée sur une relation médecin/malade.

Signalons aussi que Buffon est le premier à établir des tables de mortalité en 1777, peut-être sous l'influence de sa double formation de naturaliste et de mathématicien.

en 1760, le mathématicien D. Bernoulli propose pour la médecine le concept de risque et de gain à propos de la variole...

En 1760, le mathématicien français Daniel Bernoulli propose de déterminer l'efficacité de l'inoculation de la petite vérole en calculant le gain moyen d'espérance de vie des patients inoculés. Le projet de Bernoulli est de mesurer l'avantage effectif de l'inoculation pour la prévention de la variole au niveau collectif. Pour lui, la conclusion est sans équivoque, dans la mesure où ses hypothèses numériques sont significatives : il montre que, pour le même âge, les risques de mort sont de 1/64 pour la variole contre 1/473 pour l'inoculation. L'inoculation effectuée avant l'âge de cinq ans est d'intérêt public (A. Fagot-Largeault, 1989). Cette proposition restera sans suite du fait :

- que la technique d'inoculation est très contestée à cette époque (il faudra attendre les travaux de Jenner et sa vaccine, c'est-à-dire l'inoculation de pus de pustule de vaccine présent sur les pis de vache, puis ceux de Pasteur, pour emporter l'adhésion médicale) ;

- du manque de données empiriques fiables concernant les tables de mortalités;
- de raisons éthiques : selon son ami mathématicien d'Alembert, le gain individuel ne pouvait être ramené à une moyenne de gain pour la collectivité.

...dont
l'analyse
mathématique
est reprise par
Tremblay (1796)
puis Duvillard
(1806)

Sa méthode mathématique est ensuite améliorée par Tremblay en 1796. Pour celui-ci, l'influence exacte de la variole dans la mortalité humaine est un fait caché, révélé par l'analyse mathématique. Grâce à ses travaux sur des registres d'état civil, Duvillard, en 1806, montre par l'analyse mathématique, que, conformément à l'hypothèse de Bernouilli, la mortalité due à la variole est moindre pour les adultes que pour les enfants.

Cuvier est
à l'origine
du concept
de corrélation
utilisé en
mathématiques

Du côté du développement des mathématiques, nous considérerons comme fondateurs les travaux de Laplace (4) commencés en 1795. La publication en 1812 de sa "*Théorie analytique des probabilités*" ébauche mathématiquement la notion de corrélation ce qui renvoie au problème de la recherche de l'imputation causale, celle de convergence stochastique qui vise à traiter des données dans le but d'aider à la décision, et précise la loi des grands nombres selon laquelle il faut multiplier observations et expériences. Remarquons cependant que le concept de corrélation provient de celui de corrélation organique (I. Stengers, 1987) proposé par le naturaliste G. Cuvier (1769-1832), fondateur de la paléontologie moderne. Laplace, très influencé sur ce point par les travaux de Bernouilli, propose en 1795 une méthode mathématique d'élaboration de tables de mortalité.

1.2. Une rupture au début du XIX^e siècle

deux méthodes
de validation
dans la
recherche
des causes
émergent au
XIX^e siècle.

Dans le monde biomédical, c'est autour de l'épidémie de choléra en 1832 que différentes approches nouvelles vont se cristalliser et s'affronter, tel que le montre Piquemal (1993). Ces approches ont en commun de rompre avec les pratiques traditionnelles dans lesquelles la renommée du médecin et la lecture de signes cliniques restent prépondérantes. À cette médecine du savoir s'oppose alors la médecine comme ensemble de conduites cliniques et thérapeutiques. Cette rupture se produit dans les nouvelles structures que sont devenus les hôpitaux, sous l'influence de la montée en puissance des chirurgiens (5) qui privilégient l'action à l'observation. La déduction qui rend compte des faits cliniques de façon plausible est alors complétée

(4) Voir pour cela l'article "Laplace" de P. Costabel dans *Encyclopædia Universalis*.

(5) Voir pour cela : Foucault, M. (1963). *Naissance de la clinique*. Paris : PUF.

... elles
seront vécues
comme étant
antagonistes

par deux méthodes de validation vécues comme antagonistes et concurrentielles :

- l'expérimentation sur le vivant pour vérifier un lien causal, ce que préconise Magendie puis son élève Claude Bernard;
- le contrôle statistique des relations supposées ou des efficacités de médications rivales, tel que le propose P.C.A. Louis.

Il existe bien une forte tradition de statistiques médicales en Angleterre (Piquemal, 1993) comme le montre par exemple l'existence du traité de F.B. Hawkins datant de 1829 "*Element of medical statistics*". Mais cette tradition est fortement marquée par un point de vue hygiéniste et sociologique et elle concerne plus les gouvernants que les praticiens. Elle se situe davantage dans la lignée du projet politique issu de la Révolution française.

L'approche de Louis est fondamentalement différente. Elle se place en rupture avec la médecine anatomo-clinique pour qui seule l'observation spontanée permet de distinguer les maladies et pour qui souvent le hasard guide la découverte thérapeutique.

P.C.A. Louis
propose
des règles
codifiables...

Il propose une méthode, c'est-à-dire des règles codifiables. Cette méthode peut se caractériser par :

- la volonté d'établir une statistique anatomique universelle et uniforme : l'interprétation des observations cliniques ne peut se faire que grâce à un ensemble statistique permettant de comparer les signes et lésions observés à des données établies chez le normal ou dans d'autres maladies ;
- la volonté du pathologiste d'appliquer un ensemble de règles pour dégager des essences et des lois prenant la forme de faits généraux ;
- la prise en compte des statistiques comme l'une des modalités obligées de toute recherche médicale, comme principe décisif de toute analyse et de toute preuve.

... constituant
la méthode
numériste...

Cette méthode, nommée méthode numériste, atteint son apogée avec la publication du traité de P.C.A. Louis "*Recherches sur les effets de la saignée*" en 1835. La saignée était, en effet, encore couramment pratiquée dans les hôpitaux, sous l'influence du médecin F. Broussais (1772-1838). Dans cette étude, Louis veut tester l'efficacité de la saignée. Pour cela, il propose le suivi comparatif de deux populations, l'une ayant subi la saignée, l'autre non. Les résultats sont les suivants (J.R. Matthews, 1998) :

- sur 47 patients ayant subi une saignée, 18 meurent (soit 38 %);
- seuls 9 des 36 patients n'ayant pas subi de saignée meurent (soit 25 %).

... qui
"démontre"
l'inefficacité
de la saignée

Il en conclut la non-efficacité de la saignée.

Il fonde ensuite la "Société médicale d'observation". Ses élèves sont désignés par le terme de "numéristes". Leur

apogée sera de 1830 à 1840. Cette méthode est fondatrice car, comme le souligne M.H. Gail (1996), elle repose sur l'idée de comparer des patients en tous points identiques, excepté le traitement, (méthode surnommée aujourd'hui "Like with Like" par les anglo-saxons). C'est également ce qui fait toute sa difficulté.

cette méthode est fondatrice

Les numéristes sont les pionniers d'une volonté de rationaliser le diagnostic médical c'est-à-dire de l'objectiver et de le conduire vers une généralisation, alors qu'à cette époque c'est plus la renommée individuelle du médecin lui-même qui donne sa valeur au diagnostic. L'impact de cette école est considéré comme essentiel dans le monde anglo-saxon pour lequel Louis est le premier et l'un des quatre noms clés de l'histoire des biostatistiques (Gail, 1996).

1.3. Des polémiques naissantes

Les principales critiques de l'école des numéristes au XIX^e siècle viendront de Claude Bernard. Non que celui-ci soit contre toute mathématisation de la biologie, mais il pense "que 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." De plus, pour Claude Bernard moyennes et fréquences veulent exprimer des lois élastiques et indéterminées (J. Piquemal, 1993), alors que le projet de toute expérimentation implique un déterminisme strict. Il rejette fluctuations et exceptions, même s'il existe chez lui une certaine prise en compte de la variabilité individuelle et si ses principes de constance du milieu intérieur sont la base d'une "conception probabiliste" (Canguilhem, 1994). Son rejet vient aussi de sa conception de la relation fait/théorie. "Les faits bien observés, écrit Claude Bernard, sont eux seuls les réalités invariables, indestructibles." Ce point de vue serait dû au fait que pour "le physiologiste, confronté à la grande variation des phénomènes vitaux, [celui-ci] doit d'abord s'assurer de la constance des faits qui servent de bases à ses interprétations" (C. Debru, 1998).

pour Claude Bernard, l'approche probabiliste est incompatible avec le déterminisme scientifique

Cette hostilité bernardienne à toute approche statistique et probabiliste dans les sciences de la vie et en particulier en physiologie est aussi souvent attribuée à sa conception philosophique vis-à-vis du déterminisme. Pour G. Canguilhem, elle tient à sa volonté de "conserver une spécificité aux phénomènes biologiques par rapport à un matérialisme physico-chimique de type mécaniste, montrant par là une

certaine influence chez lui de la pensée de Bichat" (6). Cependant, sa conception de milieu intérieur, en important le concept mécaniste (par opposition au vitalisme) de milieu en biologie, opère la dissociation entre déterminisme et mécanisme.

En définitive, (A. Fagot-Largeault, 1989) Cl. Bernard se méfie des mathématiques probabilistes au nom :

- de l'autonomie de la biologie par rapport à la physique;
- d'un déterminisme strict, mettant la biologie à la "hauteur" des sciences physiques faisant pour cela du déterminisme nécessaire des phénomènes, un principe absolu qui conditionne la possibilité de l'investigation expérimentale;
- de l'imputation de la notion de variabilité à un principe vital (ce qu'il reproche à Bichat), à laquelle il oppose une régularité des phénomènes biologiques;
- du rejet d'une conception assez lâche de la causalité qu'il décele dans la communauté médicale;
- de son adhésion (relative) au positivisme de Comte;
- et aussi du fait de son rejet de l'approche anatomo-pathologique et donc des numéristes.

Une autre critique des numéristes sera faite par J. Gavarret (1809-1890). Polytechnicien devenu médecin, il publie ses "*Principes généraux de statistiques médicales*" en 1840. Redécouvert par J. Piquemal, il reste peu connu (7) aujourd'hui. Son intérêt pour le domaine fait suite à la séance du 5.10.1835 de l'Académie des sciences portant sur les travaux du Dr. Civiale. Ce dernier se propose de déterminer, par la méthode numérique, l'avantage de la méthode de la lithotritie (fragmentation du calcul avant extraction par les voies naturelles) par rapport à la lithotomie (extraction du calcul par incision) dans le cadre du traitement des calculs de vessie : "*Sur les 5715 opérations de taille qu'il a pu analyser, il trouve 1141 morts, 4478 guérisons complètes, et une centaine d'infirmités consécutives. Ainsi dans les cas seuls dont on connaît bien les résultats, la mortalité est d'environ un cinquième pour tous les âges. Or il est bon de rappeler que plus de la moitié de ces malades n'avaient pas atteint leur quatorzième année ; et l'on sait qu'à cet âge les chances de guérisons sont au moins doubles. Par contre ces mêmes tableaux portent un total de 257 malades opérés par la lithotritie, et parmi lesquels il n'y eu que six morts, encore sur ce nombre à peine s'il y avait deux ou trois individus avant l'âge de quatorze ans ; ce qui donne un mort sur 42 malades opérés par la lithotritie.*"

un exemple
de "méthode
numérique"
présentée à
l'académie
des Sciences
par le Dr Civiale

(6) Sur la pensée de Bichat voir : Huneman, P. (1998). *Bichat, la vie et la mort*. Paris : PUF.

(7) Il est absent du *World Who's Who in science* et du *Dictionnaire of scientific Biography*.

...critiqué par
J. Gavarret...

Au cours de cette séance, les rapporteurs, dont faisait partie M. Poisson (8), profitèrent de ce compte rendu pour faire une mise au point sur les difficultés et avantages liés à l'emploi des probabilités en médecine. Ainsi pour Gavarret : *"le calcul des probabilités [est] la solution aux difficultés qui se rattachent à l'emploi de la statistique en médecine [...] comme le montre le cours de M. Poisson [...] il s'agissait de rien de moins que de régulariser l'application de la méthode expérimentale à l'art de guérir"*.

... qui fait de
même pour le
travail de Louis
sur la saignée...

Il se montre aussi très critique envers le travail de Louis sur la saignée auquel il reproche sa faiblesse mathématique : *"Les erreurs étant les mêmes pour deux groupes de malades traités par des procédés différents, ces erreurs se compensent et peuvent être négligées sans altérer sensiblement l'exactitude des résultats. Mais c'est précisément sur cette compensation d'erreurs que les doutes ont été élevés. Les statisticiens, en substituant ainsi une affirmation à une démonstration rigoureuse, se plaçaient évidemment à côté du véritable champ de la discussion."*

... ainsi que
pour l'ensemble
des travaux
de l'école
numériste

Ses critiques portent également sur l'ensemble des travaux de l'école numériste auxquels il reproche de n'être qu'une simple réforme du langage médical utilisé pour la description clinique : *"De quoi s'agissait-il pour les uns et pour les autres ? Uniquement de savoir si on remplacerait par des rapports numériques les mots souvent, rarement, dans le plus grand nombre de cas, [...]. La méthode numérique, considérée sous ce point de vue rétréci, ne pouvait s'étendre au-delà d'une simple réforme dans le langage, mais il était impossible d'y voir une question de méthode scientifique et de philosophie générale."*

il propose
d'introduire
en médecine
l'usage de
la théorie des
grands nombres
...

Il propose au contraire d'incorporer les probabilités et en particulier la loi des grands nombres en suggérant une série de règles à suivre :

"1°) Déterminer ce que l'on doit entendre par faits semblables ou comparables, propres à entrer dans la rédaction d'une statistique..."

2°) Prouver que toute conclusion déduite d'un petit nombre de faits ne mérite en thérapeutique aucune confiance, que toute statistique pour fournir des indicateurs admissibles doit contenir plusieurs centaines d'observations.

3°) Faire voir comment les lois déduites a posteriori ne sont jamais vraies que dans certaines limites d'oscillations et donner le moyen de déterminer ces limites dans chaque travail particulier.

(8) Poisson, D., mathématicien français (1781-1840), auteur des *Recherches sur la probabilité des jugements* (1837) dans lequel apparaît pour la première fois la distribution dite de Poisson ou loi de Poisson des grands nombres.

(Pour la troisième condition il est inutile de répéter qu'elle ne se trouve même pas indiquée dans les ouvrages [des médecins])"

... pour éliminer
la part
du hasard

Mais l'introduction de cette loi, si elle diminue la part du hasard dans les différences numériques constatées entre deux groupes, ne permet pas de lever la contradiction collectif/individu qui reste le problème majeur du monde médical. Ses propositions restant sans grand effet, Gavarret s'orientera par la suite vers des travaux de biophysique.

L'école numériste française perdra progressivement de son influence au cours du XIX^e siècle. Les principaux obstacles rencontrés sont :

- l'incapacité des élèves de Louis à dégager des généralités du fait de la grande diversité biologique à laquelle ils sont sans cesse confrontés;
- l'utilisation d'un outil mathématique mal adapté à leur but : les problèmes posés à ces mathématiques sont trop complexes pour leur état d'évolution. Ainsi, une épidémie comme celle du choléra ne peut se ramener à une loi binominale simple pour laquelle chaque tirage doit être indépendant, ce qui n'est pas le cas dans une épidémie qui contient en elle-même l'idée de contagion (J. Piquemal, 1993).

1.4. Introduction des tests statistiques au XX^e siècle

développement
de l'usage
du test du χ^2
en biologie
dans les
années 30

L'introduction des tests statistiques viendra transformer la situation au début du XX^e siècle. Ainsi le célèbre test du χ^2 sera proposé en 1900 par le mathématicien anglais Pearson. Le développement de ces tests se fait en biologie dans les années 30, principalement sous l'influence de l'agronome anglais R.A. Fisher (1890-1962) (H.M. Marks, 1999). Statisticien et généticien, il est aussi l'un des fondateurs de la génétique mathématique des populations (E. Mayr, 1989). Il contribue ainsi de façon active au rapprochement entre génétique et théorie darwinienne de l'évolution aboutissant à la théorie synthétique de l'évolution. Ces travaux de biostatistiques se font dans la lignée de l'école de biométrie anglaise issue des recherches sur l'hérédité de F. Galton (1822-1911).

R.A. Fisher
est à l'origine
des plans
expérimentaux
randomisés
en biologie

Fisher propose une méthode formelle de randomisation de l'expérimentation en recherche agronomique. Ainsi, lorsqu'on veut décider de l'efficacité d'un nouvel engrais ou d'un nouveau traitement, du fait de l'impossibilité de contrôler toutes les variables influençant l'expérience, la place de la plante dans le champ de l'expérience doit être laissée au hasard. Ensuite, pour déterminer la signification statistique de l'écart éventuel qui se manifeste, le chercheur doit faire appel à des tables de probabilités. Il s'agit d'un renversement conceptuel : le hasard n'est plus seulement évoqué

ou craint, il devient central dans le raisonnement puisque la question posée est de savoir si la différence observée entre deux échantillons est due ou non au hasard.

L'influence des travaux de Fisher sur le monde médical s'établit par l'intermédiaire des structures universitaires anglaises et américaines. Elle aboutit à la formation d'équipes de biostatisticiens aussi bien au sein de ces universités qu'au sein des grands organismes d'état comme le "Medical Research Council" (MRC) en Angleterre, le "National Institut of Health" (NIH) et la "Food and Drog Administration" (FDA) aux États-Unis.

Dans la recherche médicale, même si l'idée de randomisation existe depuis longtemps comme nous l'avons déjà signalé, la prise en compte de cette méthode sera beaucoup plus lente que dans le domaine de l'agronomie et de l'écologie. M.H. Gail suggère deux raisons à cela :

- d'une part la formation insuffisante des médecins en statistique,
- d'autre part la résistance du milieu médical à son usage pour des raisons d'éthique.

Il faudra toute la persévérance, la force de persuasion de quelques hommes au sein des organismes cités ci-dessus, pour changer la situation.

Le premier essai clinique véritablement randomisé (R.P. D'Arcy Hart, 1999) sera l'évaluation de l'effet de la streptomycine sur la tuberculose en 1948. Il est organisé par le MRC sous la direction médicale de D'Arcy Hart, spécialiste de la tuberculose, et sous l'autorité du statisticien A.B. Hill. Celui-ci dans ses "Principles of medical statistics" insiste dès 1937 sur la nécessité de comparer "like with like" et de façon simultanée et non *a posteriori* de façon historique, c'est-à-dire en consultant des cas cliniques. Cette fois-ci, l'approche statistique organise de façon préalable l'expérimentation. Comme dit de lui R. Doll (1998) "le génie de A.B. Hill (...) fut de prendre en compte la susceptibilité médicale vis-à-vis des problèmes d'éthique et d'exposer avec clarté et simplicité les protocoles à suivre". En particulier, son protocole comportait la possibilité de changer de traitement en cas d'aggravation de l'état de santé du malade.

Un autre statisticien dont le pouvoir de persuasion contribua à faire accepter ce type de méthode pour la conception des essais cliniques, comme le souligne Gail, est J. Cornfield. Ce dernier fut directeur de la FDA de 1958 à 1976. Il milita particulièrement pour l'introduction des méthodes bayésiennes (9) à partir de 1966.

en 1948,
premier essai
clinique
véritablement
"randomisé"

(9) Méthode mathématique probabiliste dérivée des travaux du mathématicien Bayes.

les statistiques
permettent
aussi d'établir
l'imputation
causale

L'autre grand domaine d'application des biostatistiques en médecine est la recherche en vue de l'établissement d'une cause et l'établissement d'un risque vis-à-vis de telle ou telle pathologie. Les premiers travaux véritablement fondateurs de cette voie sont ceux de R. Doll et de A.B. Hill. Leur étude concerne la mise en cause du tabagisme dans le cancer du poumon. Elle consista à analyser les réponses données à un questionnaire envoyé en 1951 à 59 600 membres de la profession médicale au Royaume Uni. Ils reçurent 40 701 réponses utilisables en retour. Cette cohorte fut suivie jusqu'au 31.03.56 pour déterminer les risques de cancer de poumon. Ces résultats sont confirmés en juin 1957 par le "Study Group On Smoking and Health" encadré par les grands instituts de santé américains. Ces travaux valident par la même occasion la méthode statistique utilisée par Doll et Hill dans la recherche d'une cause. Ils établissent également la notion de facteur de risque (M.H. Gail, 1996).

1.5. Les biostatistiques en France au xx^e siècle

banalisation
de l'usage
des statistiques,
à partir de 1950

L'introduction en France de ces méthodes biostatistiques s'effectuera, comme dans l'ensemble des pays développés, dans les années 50. L'usage des biostatistiques dans les sciences de la vie en France doit aussi beaucoup aux travaux de D. Schwartz (10) à l'INSERM et à ses écrits de vulgarisation. Avec J. Lellouch, il formalise en 1967 la distinction entre les modèles de connaissances ou de compréhension (c'est-à-dire l'identification de variables et la mise en évidence d'une imputation causale), et ceux d'aide à la décision qualifiés de pragmatiques (davantage en relation avec le prédictif). Les modèles pragmatiques sont utilisés lorsqu'il est impossible d'appliquer un test du genre essai en double aveugle dans lequel ni le patient ni le médecin ne connaissent la véritable nature du traitement : il est éthiquement impossible d'attendre la fin d'un essai pour décider de la mise en place d'un nouveau traitement avantageux, comme il est éthiquement impossible de laisser la population témoin avec un traitement moins performant voire un placebo (du sucre).

les modèles
pragmatiques
d'aide à la
décision, face
à une certaine
méfiance du
corps médical

Les modèles pragmatiques d'aide à la décision se sont souvent heurtés à une certaine méfiance du corps médical du fait d'une impression d'un manque de rigueur. Les récentes épidémies comme celle du SIDA, pour des raisons d'éthique évidentes, mais aussi sous la pression des patients eux-mêmes, finirent par en faire accepter l'usage.

(10) Schwartz, D. et Lellouch, J. (1967). Explanatory and pragmatic attitudes in therapeutic trial. *Journal of Chronic Disease*, 20, 637.

Ainsi, l'étude de la naissance des biostatistiques montre que celles-ci interviennent dans la démarche expérimentale non seulement en mettant en forme et en permettant l'analyse des données, ce qui correspond à la fonction qu'on leur attribue classiquement, mais aussi en organisant l'expérience comme le montrent les travaux de Louis ou de Fisher. Elles s'affirment également, par la suite, comme méthode de validation en tant que telle dans la recherche de la preuve et de l'explication causale, clôturant par là même la polémique née au XIX^e siècle.

2. STATISTIQUES, PROBABILITÉS ET CONCEPTUALISATION EN BIOLOGIE

Un autre rapport aux statistiques et probabilités naîtra dans la deuxième moitié du XIX^e siècle grâce aux travaux de Mendel et à la naissance de la génétique (Piquemal, 1993). L'impact des statistiques et probabilités est, dans ce cadre, alors davantage conceptuel.

à propos de
l'hybridation
des végétaux...

En janvier 1860, l'Académie des Sciences de Paris met au concours le problème de l'hybridation des végétaux, c'est-à-dire le problème de la fécondité des hybrides, et celui de leur stabilité en tant que variété.

Cette problématique est traditionnelle et se situe dans la lignée des travaux du XVIII^e siècle, comme ceux du mathématicien français Maupertuis (1698-1759). Il s'agit :

- de poser le problème en terme de stabilité des espèces;
- et de poser celui de la variation en terme de variété.

Cette problématique tourne autour de la scientificité de la notion d'espèce sur un fond plus récent de théorie de l'évolution.

... les travaux
de Naudin
(1860)

Naudin, en 1860, se situe aussi dans ce cadre traditionnel. On lui doit de fait la première loi dite de Mendel sur l'hybridation de première génération, reformulée par Arnold Lang en 1914. Ce qui l'intéresse biologiquement c'est :

- la globalité de forme de la première génération qui se présente comme "espèce" nouvelle ;
- la dissolution en formes bigarrées dans les générations suivantes traduisant un retour aux formes précédentes.

L'approche de Mendel en 1865 sera tout autre. En effet, il ne connaît pas les travaux de ses prédécesseurs et ses publications ne formalisent pas de lois ni n'utilisent le mot hérédité. Elles sont cependant fondatrices d'un nouveau champ disciplinaire : la génétique.

la génétique
mendélienne...

Il prend à contre-pied les questions traditionnelles liées à l'hybridation en choisissant volontairement des hybridations faciles et des fécondation assurées. Ce nouveau domaine se caractérise par :

- la transmission de caractères indépendants,

... est
combinatoire

- la mise en évidence de mécanismes de type combinatoire (11),
- le rejet du problème des types biologiques (espèce, variété).

Ses expériences sont parlantes parce qu'elles ont été instituées pour l'être et c'est sur l'aspect méthodologique qu'il demande à être jugé. Elles se fondent sur la confrontation des statistiques de fréquences des caractères étudiés avec les conclusions de modèles probabilistes. Mendel avait enseigné les mathématiques et les humanités au *Gymnasium* de Znaim et il s'était familiarisé avec l'analyse combinatoire et le calcul des probabilités en suivant les cours d'Andreas Von Ettinghausen (1853) (Y. & M. Girault, 1999). Ses idées resteront marginales du fait :

- d'un formalisme mathématique très personnel qui rebu-tera la communauté des biologistes ;
- de la rupture conceptuelle que présentent ses travaux.

dans la
même lignée
conceptuelle,
les travaux de
T.H. Morgan
sur la drosophile

Dans une même lignée conceptuelle, T.H. Morgan (1866-1945) établit à partir de 1910 (12), par l'expérimentation sur la mouche du vinaigre *Drosophila melanogaster*, la localisation des unités mendéliennes (nommées gènes par W. Johannsen). Le choix de son support expérimental, son attention portée aux exceptions aux "lois" de Mendel, une pensée de type probabiliste expliquent ce succès. Morgan, embryologiste à l'université Columbia à New York puis à l'institut technologique de Pasadena en Californie, n'est pas au départ un partisan de Mendel comme beaucoup de ses collègues zoologistes. Il change d'avis à la suite de sa visite au laboratoire de de Vries en Hollande, duquel il retient l'idée de mutation sous l'influence de facteurs physiques, et à la suite de ses premiers travaux sur un nouvel animal de laboratoire, la mouche du vinaigre "*Drosophila*" en 1909 (E. Mayr, 1989). L'obtention de la mutation œil blanc (la forme sauvage est à œil rouge) et l'étude de la transmission de ce caractère muté l'amènent à établir une relation entre la couleur des yeux et le sexe chez *Drosophila* (*sex-linked* ou *linkage*). "*C'est le point de départ de minutieuses analyses qui permettent à Morgan de prouver que le gène responsable de la couleur des yeux est localisé sur le chromosome X, Cytologie et Génétique trouvent alors un premier accord... Une année après, Morgan propose un modèle structural d'arrangement linéaire des gènes sur les chromosomes. Pour cela, reprenant l'idée de chiasmata proposée en 1909... il suggère que pendant la méiose les cassures chromosomiques observées peuvent donner lieu à des échanges d'éléments entre chromosomes homologues, dont la proba-*

(11) Voir sur ce thème Rumelhard, G. (1986).

(12) Morgan, T.H. (1910). Sex limited inheritance in *Drosophila*. *Science*, 32, 120.

les cartes
factorielles sont
probabilistes

bilité dépend de leur distance.” (D. Tesi & A. Giordan, 1987). Ces idées, constituées à partir d’une explication théorique (*crossing over*) correcte des exceptions observées aux lois de Mendel sur la ségrégation indépendante des caractères, permirent l’établissement des premières cartes factorielles. Dans celles-ci la position relative des gènes (facteurs mendéliens) est déduite des pourcentages de recombinaisons affectant les gènes (allèles mutés) ; plus la fréquence est importante plus les gènes sont éloignés les uns des autres. Par recoupement et analyse statistique de plusieurs cartes factorielles portant sur plusieurs gènes portés sur un même chromosome, Morgan a pu établir les premières cartes chromosomiques. La distance linéaire entre gènes portés par un même chromosome est exprimée dans une unité arbitraire, appelée aujourd’hui le centimorgan, dont l’unité correspond à 1 % de recombinaison.

L’exemple de la naissance de la génétique assigne aux statistiques et probabilités une nouvelle fonction vis-à-vis de la biologie : elles participent pleinement à sa conceptualisation.

3. LES MATHÉMATIQUES, AIDES ET OBSTACLES DANS LE DOMAINE DES SCIENCES DE LA VIE

3.1. Obstacles à la mathématisation

Cette analyse historique des relations établies entre la médecine, la physiologie, l’agronomie, la génétique et les statistiques montre que la mathématisation se heurte à des obstacles :

- d’ordre philosophique, comme par exemple le problème du déterminisme ; l’historien des sciences G. Israël (1996) montre comment le déterminisme bernardien se structure progressivement : *“entre l’introduction à l’étude de la médecine expérimentale de 1865 et les leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux de 1878 se produit, dans la conception de Claude Bernard, un glissement du causalisme métaphysique [à la Leibniz, tel que la science française l’hérite de Laplace] à une vision qui tend à éliminer toute interprétation ontologique pour le transformer en une doctrine de l’analyse des conditions initiales qui déterminent des phénomènes”* ;
- d’ordre éthique et nous avons vu ci-dessus que cet obstacle ne sera dépassé là aussi que très difficilement jusqu’aux travaux de Hill et de Schwartz ;
- d’ordre biologique avec essentiellement le problème de la complexité et de la variabilité biologique et, comme le soulignait déjà Cl. Bernard, le vivant ne saurait être “enfermé” dans des lois mathématiques.

les obstacles à la
mathématisation
sont
philosophiques,
éthiques,
épistémologiques

3.2. Les mathématiques, aides et obstacles

L'analyse historique permet également de faire les observations suivantes.

la
mathématisation :
aide à une
rationalisation
de
l'expérimentation

- La mathématisation est une aide vers une rationalisation progressive de l'expérimentation dans ces domaines. Le terme de rationalisation est utilisé ici dans la lignée du rationalisme appliqué comme l'entendait G. Bachelard. Elle se situe en particulier du côté des faits scientifiques et il y a bien une volonté historique de passer d'analyses subjectives de signes cliniques dans lesquelles la personnalité même de l'auteur est primordiale, à une analyse objective de données de plus en plus préparées grâce à l'introduction des statistiques et des probabilités même si la sémiologie reste essentielle dans le diagnostic médical (G. Canguilhem, 1994). Il faudra pour cela passer d'une théorie des signes à une conception positiviste du fait scientifique puis à une vision beaucoup plus relativiste.

... aide dans
le dépassement
de certains
obstacles...

- La mathématisation est une aide dans le dépassement partiel de certains obstacles comme celui de la variabilité biologique. Ainsi pour D. Schwartz (1996), l'apport essentiel de la statistique est dans le fait de résoudre le problème de l'opposition entre l'individuel et le collectif grâce à l'usage de la moyenne et de la variance :

- la moyenne renvoie au collectif,
- la variance réintroduit l'individuel.

... mais aussi
obstacle
par elle-même

- Mais la mathématisation est aussi un obstacle par elle-même :

- un obstacle lorsque la mesure devient caricaturale comme dans le célèbre exemple de l'établissement d'une composition moyenne d'une urine européenne cité par Cl. Bernard (13), ou qu'elle sombre dans la démesure et dérive vers le racisme au cours du XIX^e siècle ;
- un obstacle enfin lorsque l'état du développement des mathématiques se heurte à la complexité des problèmes biologiques.

4. MATHÉMATIQUES ET SCIENTIFICITÉ

À cette analyse s'ajoute celle de la signification de la mathématisation elle-même. La mathématisation d'une science

(13) "Si l'on recueille l'urine d'un homme pendant vingt-quatre heures et qu'on mélange toutes les urines pour avoir l'analyse moyenne, on a précisément l'analyse d'urine qui n'existe pas ; car à jeun l'urine diffère de celle de la digestion, et ces différences disparaissent dans le mélange. Le sublime du genre a été imaginé par un physiologiste qui, ayant pris de l'urine dans un urinoir de la gare de chemin de fer où passaient des gens de toutes nations, crut pouvoir donner ainsi l'analyse de l'urine moyenne européenne !" (Claude Bernard, 1865, p. 192).

la question
de la possibilité
et de la
signification
de la mesure

renvoie aux fondements épistémologiques de cette science voire des sciences en général. Elle est liée au concept de rationalité tel que l'entendait Gaston Bachelard. Elle renvoie aussi à l'idée de quantification et de formalisation. Par quantification nous entendons rigueur conceptuelle et mesure. Nous avons vu avec Mendel et Morgan en quoi statistiques et probabilités participent à cela en sciences de la vie. Mais il faut aussi se poser la question de la possibilité et de la signification de la mesure. Évoquons pour cela le travail épistémologique effectué par Maurice Reuchlin (1962) à propos de l'introduction de méthodes quantitatives en psychologie : *"Si mesurer consiste à attribuer des nombres aux choses selon certaines règles, certaines règles peuvent être plus ou moins restrictives. Les nombres ainsi attribués jouiront de propriétés d'autant plus nombreuses que les règles d'attributions auront été plus précises, c'est-à-dire qu'aura été plus puissante l'axiomatique de l'expérimentateur."*

Il faut donc éviter de poser le problème en termes de faits mesurables ou non mesurables mais plutôt se référer à l'idée de l'existence d'échelles de quantification liées à des niveaux de mesure tels que l'a établi S.S. Stevens (14). Selon celui-ci, nous pouvons distinguer quatre niveaux de mesure :

le problème
ne se pose pas
en terme de
mesurable ou
non mesurable
mais en
se référant à
des échelles de
quantification

- le plus faible, l'échelle nominale qui revient à attribuer un nombre à une "chose" ;
- les échelles ordinales qui permettent par exemple de situer un sujet par rapport à une variable avec la notion de décile (15), de moyenne ;
- les échelles d'intervalles qui permettent de savoir si la différence entre deux groupes est égale ou non à la différence entre deux autres groupes avec la notion, d'écart type, de test ;
- au plus puissant, les échelles de rapports pour lesquelles toutes les relations de l'arithmétique ont une signification comme, par exemple, c'est le cas pour les grandeurs fondamentales de la physique.

Nous trouvons là de ce fait une nouvelle grille d'analyse de l'évolution historique des biostatistiques puisque tout se passe comme s'il se produisait un déplacement, certes par à-coups, le long de l'axe des échelles de quantification :

- usage d'échelles ordinales avec les numéristes,
- tentatives d'usage d'échelles d'intervalles, en échec avec Louis, Gavaret, réussies avec Fisher, Hill, Doll.

Au total, nous avons pu mettre en évidence que, loin d'être un simple outil, les mathématiques :

(14) Cité par Reuchlin (1962).

(15) Par exemple le 10 % des courbes médicales de croissance.

- permettent d'expliquer des résultats expérimentaux,
- créent et constituent certaines observations,
- rendent possibles des expérimentations,
- participent à la conceptualisation de la biologie.

Elles prennent aussi leur place à côté de l'expérimentation comme méthode de validation dans la recherche de l'imputation causale (16). Remarquons toutefois (A. Fagot-Largot, 1989) les points suivants.

- D'une part, l'assignation causale balance entre deux extrêmes :

- à l'un des extrêmes, on raconte une histoire (...) (et) les critères de causalités sont essentiellement chronologiques et impurs (comme c'est souvent le cas en biologie) ;
- à l'autre extrême, on conclut à la causalité par des techniques de raisonnements sophistiquées, à partir d'expériences contraintes tout exprès, les plans expérimentaux permettant de n'observer qu'une réalité épurée, simplifiée (comme c'est souvent le cas en physique) ;
- entre ces deux extrêmes, on n'a ni une histoire complète, ni une démonstration statistique complète, mais on juge des liens causaux sur un faisceau composite de preuves fragmentaires dont il faut apprécier la valeur...

- D'autre part, les critères probabilistes ne suffisent pas en toute rigueur à rendre compte de l'écart existant entre explication et prédiction.

Nous retrouvons de fait la place qu'il est reconnu aux mathématiques en tant que critère de scientificité : elles sont à la fois langage, outil et modèle (G. Rumelhard, 1997). Mais cette reconnaissance n'est pas en soit immédiate, ni sans poser des difficultés. Ainsi, dans le domaine médical et physiologique, si Claude Bernard pose en critère de scientificité l'expérimentation au laboratoire, G. Canguilhem, pour sa part, évolue de cette position, qu'il adopte plus ou moins en 1943, vers une position différente, suite aux travaux de Piquemal et de Fagot-Largeault qu'il dirige. Il admet alors que *"c'est bien dans l'effort pour probabiliser le jugement médical qu'il faut voir un des vrais commencements de la scientificité de la médecine"*. Mieux encore, *"la logique du probable que la médecine doit prendre en compte est une science de l'espérance et du risque. Sous ce rapport elle est authentiquement une science de la vie."* (G. Canguilhem, 1994). Face à une éthique qui est bien souvent fondée sur la peur (Hans Jonas), il faut apercevoir ici l'allusion à une éthique du risque assumé et du dépassement.

l'assignation
causale
balance entre
histoire et
démonstration
rigoureuse

les probabilités
sont au cœur
des sciences
de la vie

(16) Un autre rôle, non étudié ici, serait la modélisation.

CONCLUSION

enrichissement
mutuel et
véritable
interaction
entre les deux
disciplines

Cette analyse historique éclaire d'un jour particulier les relations établies entre les mathématiques et les sciences de la vie. Celles-ci ne vont pas chercher des solutions prêtes à l'emploi dans des mathématiques souveraines. Il y a au contraire enrichissement mutuel et véritablement interaction entre ces deux champs de connaissance. Cette interaction favorise le développement des mathématiques qui empruntent des concepts et des méthodes aux sciences de la vie (ex. Buffon, Fisher, Schwartz...), et dans l'autre sens ces mêmes mathématiques participent à la conceptualisation de ces autres sciences et renouvellent les démarches utilisées.

cependant
absence des
biostatistiques
dans les
programmes
de SVT des
lycées

S'il est clair que les biostatistiques ont permis de remarquables avancées dans les sciences de la vie, nous ne pouvons qu'en constater l'absence dans les programmes français actuels des Sciences de la Vie et de la Terre au lycée. Il nous semble pourtant qu'il y aurait avantage à introduire, dans ces mêmes programmes, les concepts de variabilité (M. Cantor, 1995), de facteurs de risques (M. Coquidé *et al.*, 1997), de causalité (G. Rumelhard, 1994), les méthodes contemporaines d'échantillonnages et de conceptions d'expériences ainsi que les problèmes d'éthique qui y sont liés.

L'objectif affiché dans les instructions officielles, est, pour les séries "S", celui de formation scientifique. Ne faut-il pas pour cela tenir compte, dès qu'elle est possible, d'une certaine mathématisation des sciences de la vie si on admet celle-ci en tant que critère de scientificité ? Cela permettrait en amont de favoriser une co-évolution de ces disciplines telle que la souhaitent aujourd'hui de plus en plus de biologistes.

Jean-Marc LANGE
IUFM de l'académie de Rouen

ÉLÉMENTS DE BIBLIOGRAPHIE

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

CANGUILHEM, G. (1968). *Études d'histoire et de philosophie des sciences concernant les vivants et la vie*. 7^e éd. augmentée, 1994, Paris : Vrin.

- CANTOR, M. (1995). Réhabilitation de la diversité et besoin d'unité en biologie. *Tréma*, 9-10, 55-64. IUFM Montpellier.
- COQUIDÉ, M., BOURGEOIS, P., LANGE, J.-M. & LE PRIELLEC, M. (1997). L'éducation aux risques dans la formation d'enseignants : quels enjeux ? quels problèmes? In A. Giordan, J.-L. Martinand et D. Raichvarg (éds.). *Actes des XIX^{es} J.I.E.S.* Paris.
- DEBRU, C. (1998). *Philosophie de l'inconnu : le vivant et la recherche*. Paris : PUF.
- D'ARCY HART, R.P. (1999). A change in scientific approach : from alternation to randomised allocation in clinical trials in the 1940's. *British Medical Journal*, 319, 572-573.
- DOLL, R. (1998). Controlled trials : the 1948 watershed. *British Medical Journal*, 317, 1217-1220.
- FAGOT-LARGEAULT, A. (1989). *Les causes de la mort : histoire naturelle et facteurs de risques*. Paris : Vrin.
- GAVARRET, J. (1840). *Principes généraux de statistiques médicales*. Paris : Beschet jeunes et Labé.
- GAIL, M.H. (1996). Statistics in Action. *Journal of the Statistical Association*, 91, 433, 1-13.
- GIORDAN, A. (éd.) (1987). *Histoire de la biologie*. Paris : Technique et documentation-Lavoisier.
- GIRAULT, Y. & M. (1999). *L'aléatoire et le vivant*. Paris : Diderot multimédia.
- ISRAËL, G. (1996). *La mathématisation du réel*. Paris : Le Seuil.
- MATTHEWS, J.R. (1998). In T. Colton, P. Armitage (eds.). *Encyclopedia of Biostatistics*. London : Wiley.
- MARKS, H.M. (1999). L'irruption de la preuve statistique en médecine. *La Recherche*, 316, 76-81.
- MAYR, E. (1989). *Histoire de la Biologie*. Paris : Fayard.
- PIQUEMAL, J. (1993). *Essais et leçon d'histoire de la médecine et de la biologie*. Paris : PUF.
- REUCHLIN, M. (1962). *Les méthodes quantitatives en psychologie*. Paris : PUF.
- REY, R. (1994). Naissance de la biologie et redistribution des savoirs. *Revue de synthèse : IV^e S. N° 1-2*, janvier-juin.
- RUMELHARD, G. (1986). *La génétique et ses représentations*. Berne : Peter Lang.
- RUMELHARD, G. (1994). Enseignement et apprentissage de la causalité en biologie. *Biologie Géologie (APBG)*, 1, 119-129.
- RUMELHARD, G. (1997). Travailler les obstacles pour assimiler les connaissances scientifiques. *Aster*, 24, 13-35.

STENGERS, I. (1987). *D'une science à l'autre. Des concepts nomades*. Paris : Le Seuil.

TESI, D. et GIORDAN, A. (1987). Histoire des concepts de chromosomes et de gènes. In A, Giordan (éd.). *Histoire de la biologie* (p. 202). Paris : Technique et documentation-Lavoisier.

SCHWARTZ, D. (1996). Les modèles en biologie et en médecine. *Pour La Science*, 227, 38-45.

LA VARIABILITÉ DE LA TAILLE ET DU POIDS CHEZ L'HOMME : MOYENNE STATISTIQUE, NORMALITÉ, NORMATIVITÉ. Une approche interdisciplinaire au collège

Monique Arrighi

Les instructions officielles invitent les enseignants de la classe de 3^e à travailler sur la variabilité du vivant humain notamment à travers le cours de génétique intitulé : "Unité et diversité des êtres vivants humains". Ce sujet d'étude fait naître chez les élèves un questionnement à propos des limites entre le normal et l'anormal dont la réponse n'est pas seulement dans le cours de biologie. En effet, la biologie doit utiliser des concepts mathématiques statistiques, servant également de référence dans le monde médical, qui définissent des frontières de la normalité. Mais les réponses statistiques ne résolvent pas le malaise des jeunes qui ne se trouveraient pas dans les normes reconnues à un instant donné et dans un lieu géographique défini. Nous proposons de chercher dans le domaine de la philosophie si la norme est la moyenne, si elle est un idéal, si elle est à construire par chaque personne. En s'appuyant sur les statistiques et sur la philosophie, il s'agit donc de présenter et de rendre accessibles des éléments de réponses et de réflexions au sujet de la norme. La démarche devrait apporter comme message, que chacun doit s'accepter tel qu'il est, et qu'il a la possibilité de vivre au mieux sa vie. Ainsi cette étude de la variabilité du vivant donne un sens aux concepts statistiques.

à l'interface
de la biologie, des
mathématiques
statistiques
et de la
philosophie...

L'enseignement de la variabilité du vivant humain et de ses limites se situe à l'interface entre trois disciplines d'enseignement : la biologie et plus spécialement la génétique, les mathématiques statistiques, et la philosophie. Nous pouvons en effet nous demander si cette variabilité présente des limites qui sont relatives à un contexte social et culturel donné ou bien relatives à une appréciation individuelle ou au contraire des limites absolues et universelles, car objectivables par un procédé scientifique comprenant mesures et modélisation.

... l'étude
de la variabilité
de la taille
et du poids

Les professeurs de Sciences de la Vie et de la Terre dans l'enseignement secondaire sont invités à traiter de la variabilité du vivant humain, notamment en classe de 3^e, à travers les cours de génétique humaine dans le chapitre "Unité et diversité des êtres humains". Il s'agit d'étudier "l'influence du milieu... sur l'expression des caractères individuels... à travers un ou deux exemples simples choisis de sorte qu'ils ne renvoient pas essentiellement à des maladies..." (1999)

suis-je normal ?
se demande
l'élève

En effet, on peut affirmer que chaque être vivant humain est unique à cause de ses marqueurs génétiques par exemple. Il s'agit alors de concilier l'unicité de l'individu et l'analyse de la variabilité de certains caractères, tels la taille et le poids, au sein de l'espèce humaine. Le problème est que, tout en étant unique, une personne peut être cependant comparée aux autres sous l'angle des caractères de taille et de poids. Si l'individu devient trop différent des autres, il risque de devenir "hors norme". Il faudra alors se demander où se trouve la limite entre la norme et le "hors norme" et si le "hors norme" est anormal ou pathologique. Cette interrogation à propos de la normalité se traduit chez l'adolescent par une certaine inquiétude et parfois de l'angoisse, surtout quand il s'agit du corps (taille, masse et corpulence). Cette demande n'est donc pas une simple curiosité, mais correspond à un besoin profond, source de recherche personnelle ou d'assimilation d'un enseignement. Le champ disciplinaire de la biologie, à lui seul, ne peut répondre à ce questionnement sur la normalité.

Nous chercherons d'abord des éléments de réponses provenant du domaine médical, dans les carnets de santé individuels. Puis nous définirons les concepts statistiques utilisés dans ces carnets et nous les interpréterons grâce aux modèles mathématiques statistiques. En cours de Sciences de la Vie et de la Terre, en classe de 3^e, nous proposerons de reconstituer les étapes de la démarche qui a permis aux médecins-chercheurs de tracer graphiquement des limites entre le normal et l'anormal. Puis nous discuterons de la limite entre le normal et le pathologique et de son utilisation médicale en faisant appel à la philosophie.

1. DESCRIPTION DES GRAPHIQUES DE CROISSANCE

1.1. Dans les manuels scolaires de SVT de 3^e

de la
difficulté dans
l'interprétation
des graphiques
chez les
enseignants

Il est fréquent de trouver, dans les manuels scolaires, une reproduction des graphiques insérés dans les carnets de santé (comme le document 1), mais leur interprétation ne semble pas évidente. Voici, à titre d'exemple, le commentaire d'un livre du professeur : *"le document présente un graphique de l'évolution de la taille au cours des vingt premières années de la vie. C'est une courbe de référence, que l'élève retrouvera dans son carnet de santé"*. Or il ne s'agit pas d'une courbe, ni de deux. La donnée mathématique pertinente concerne l'espace, et pas seulement la surface, compris entre les deux courbes (ceci est bien illustré plus loin dans le document 11). Dans l'esprit de l'auteur "une courbe" semble certainement plus accessible aux élèves, mais cela signifie que le sens exact de ces représentations pose problème. Quant à savoir en quoi

contribuer à
une éducation
à la pensée
statistique

elle constitue une référence, ce n'est pas dit, et les valeurs d'encadrement ne sont pas précisées. Or, le professeur est confronté aux questions des élèves et il n'est pas si facile de répondre simplement à la question "ma taille est-elle normale ?" Nous serons obligés de faire un détour par les mathématiques statistiques pour trouver la signification des deux courbes qui encadrent cet espace. Ce pourrait être l'occasion de contribuer à une éducation de ces élèves de collège à la pensée statistique.

1.2. Dans les carnets de santé

À chaque consultation, le médecin mesure la taille et le poids d'un enfant et inscrit cette valeur dans le carnet de santé. Les courbes de références ont été établies par des travaux de recherche médicale dont la référence n'est pas toujours précisée, leur donnant ainsi un caractère faussement universel.

• *Des tableaux de mesures individuelles des tailles et des masses*

Les médecins se sont intéressés d'abord à la croissance individuelle de chaque enfant pour elle-même. Jusque dans les années 1970, il y a simplement des tableaux de suivi individuel de croissance, de la taille et du poids en fonction de l'âge, jusqu'à vingt ans, sans aucune valeur de référence, donc sans comparaison possible avec d'autres enfants. Ces mesures, effectuées à intervalle de temps régulier, sont dites longitudinales.

• *Des courbes de référence des variations de taille et de masse*

1945 :
des mesures
individuelles
comparées
à des courbes
de référence
"uniques"

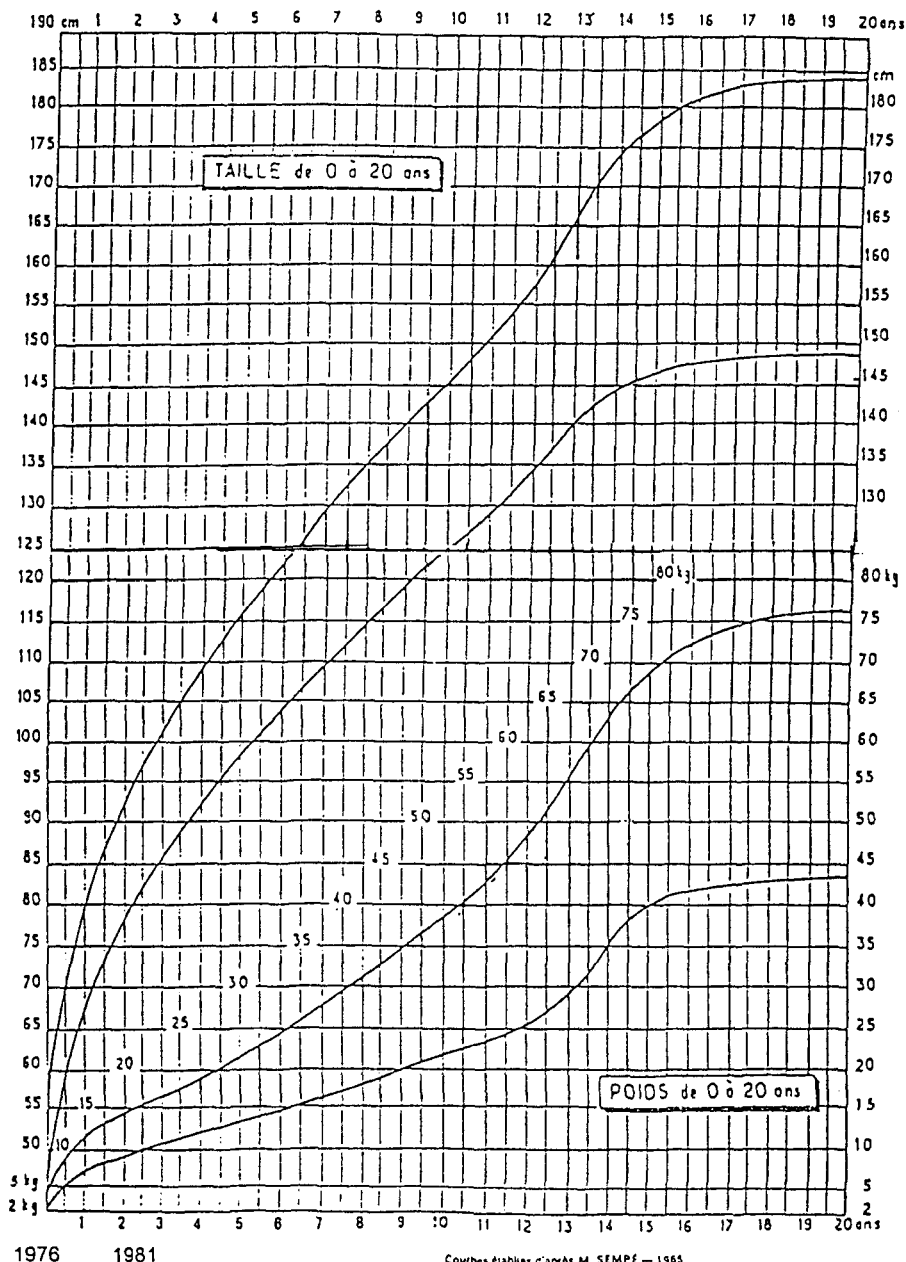
Pendant en 1945, on trouve dans un "livret de croissance" une courbe (unique) de croissance individuelle pour le poids et une courbe (unique) individuelle pour la taille en fonction de l'âge, servant de référence de la naissance à trois ans. Chacune de ces courbes présente d'abord une pente croissante puis se termine par un plateau (pente = 0). En ce sens, elles présentent une analogie avec la réalité de la croissance d'une personne. Mais si l'on s'écarte de ces courbes, la signification de l'écart n'est pas précisée.

• *Des courbes de taille et de masse issues d'études de populations*

Quand, dans une population d'enfants de même âge, on mesure la taille et la masse de chacun des enfants, on obtient des mesures dites transversales.

À partir des années 1975, le médecin a la possibilité de comparer la taille de l'enfant à celle d'autres enfants à l'intérieur d'une population. C'est ainsi que deux courbes (sans distinction de sexe !) encadrent une "zone" de normalité (le document 1 propose un exemple relevé en 1976 et en 1981

Document 1. Courbes de poids et taille de 0 à 20 ans
Carnets de santé (1976 et 1981)

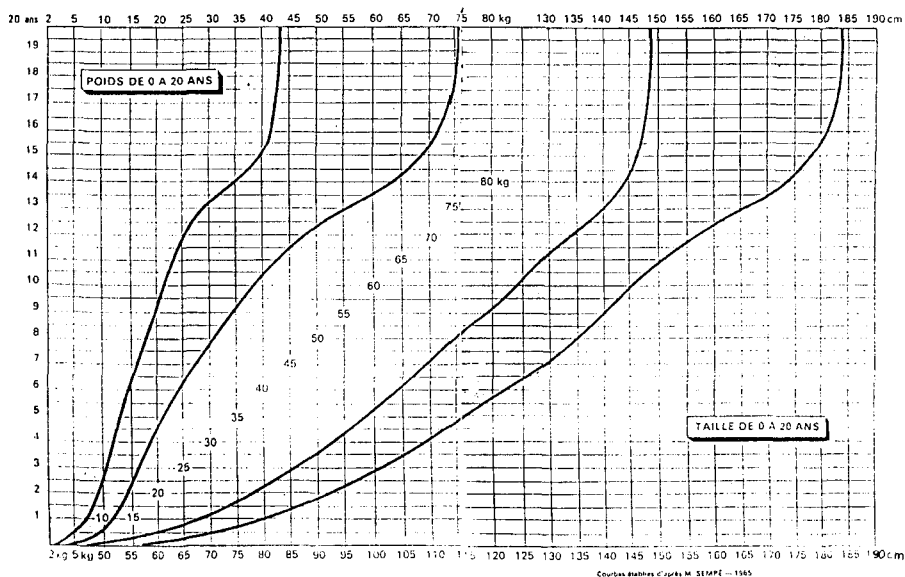


Courbes établies d'après M. SEMPE - 1965

d'après M. Sempé, 1965) pour la taille et pour le poids, à un âge donné. Dans cet intervalle les variations de taille et de poids sont considérées comme "normales" sur le plan médical. La courbe des valeurs moyennes n'est pas tracée.

Au cours de cette période, il est surprenant d'observer des courbes d'encadrement inversées et non définies d'âges en fonction de la taille, ou d'âges en fonction du poids : la taille ou l'âge étant portés en abscisses comme si c'étaient des variables (x) et l'âge en ordonnées comme une fonction (y) (document 2, 1978, d'après M. Sempé, 1965). De plus elles ne peuvent être lues comme analogiques de la réalité de la croissance humaine, il semble difficile de comprendre la logique qui a guidé leur construction. Mais dans ces mêmes carnets, il est précisé que "ces courbes... doivent être interprétées en fonction du poids et de la taille des parents". Nous remarquons que, pour la première fois, la taille semble être mentionnée comme un caractère héréditaire. Mais s'agit-il du poids et de la taille des parents adultes ? ou du poids et de la taille des parents aux mêmes âges que leur enfant ?

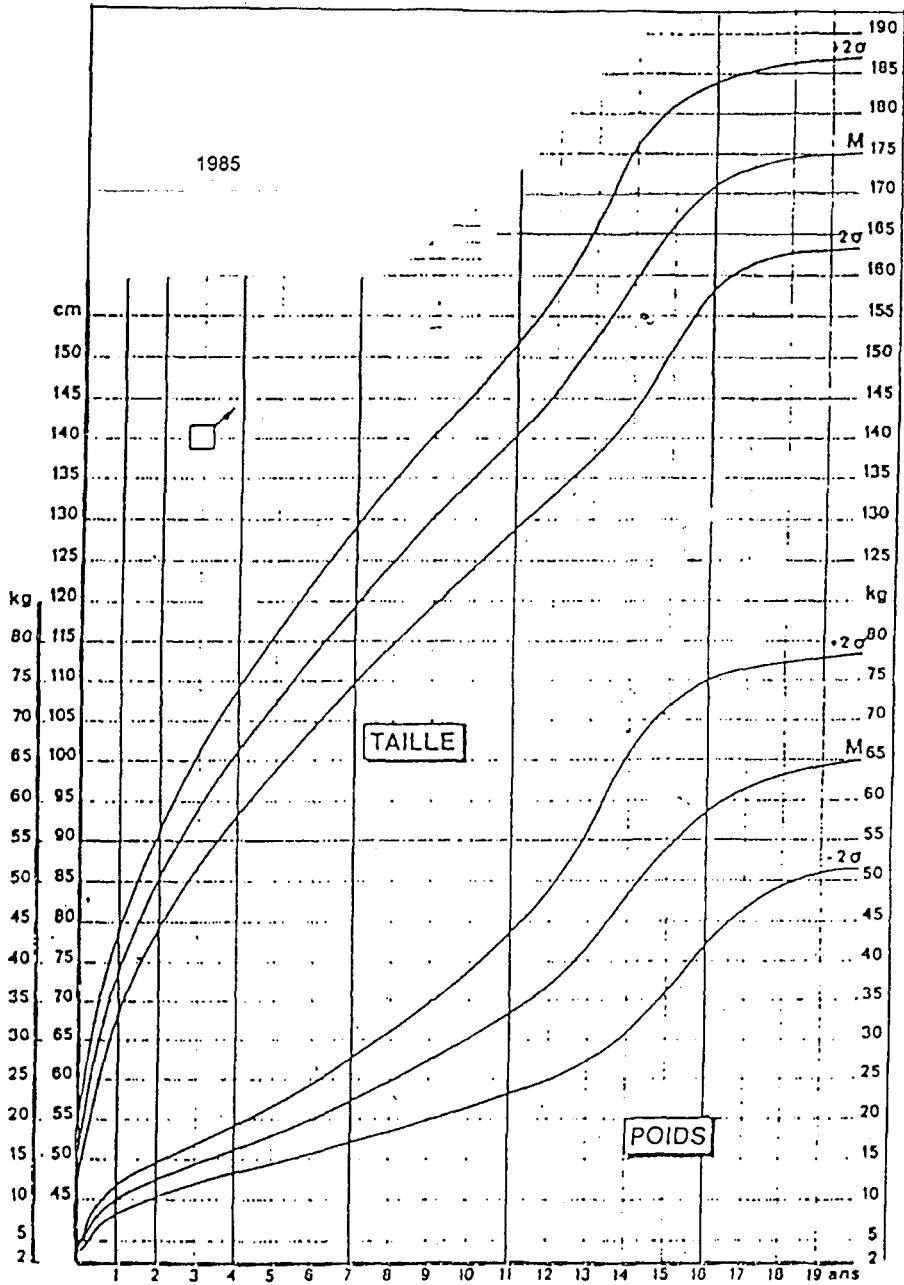
Document 2. Courbes de poids et taille de 0 à 20 ans Carnets de santé (1978)



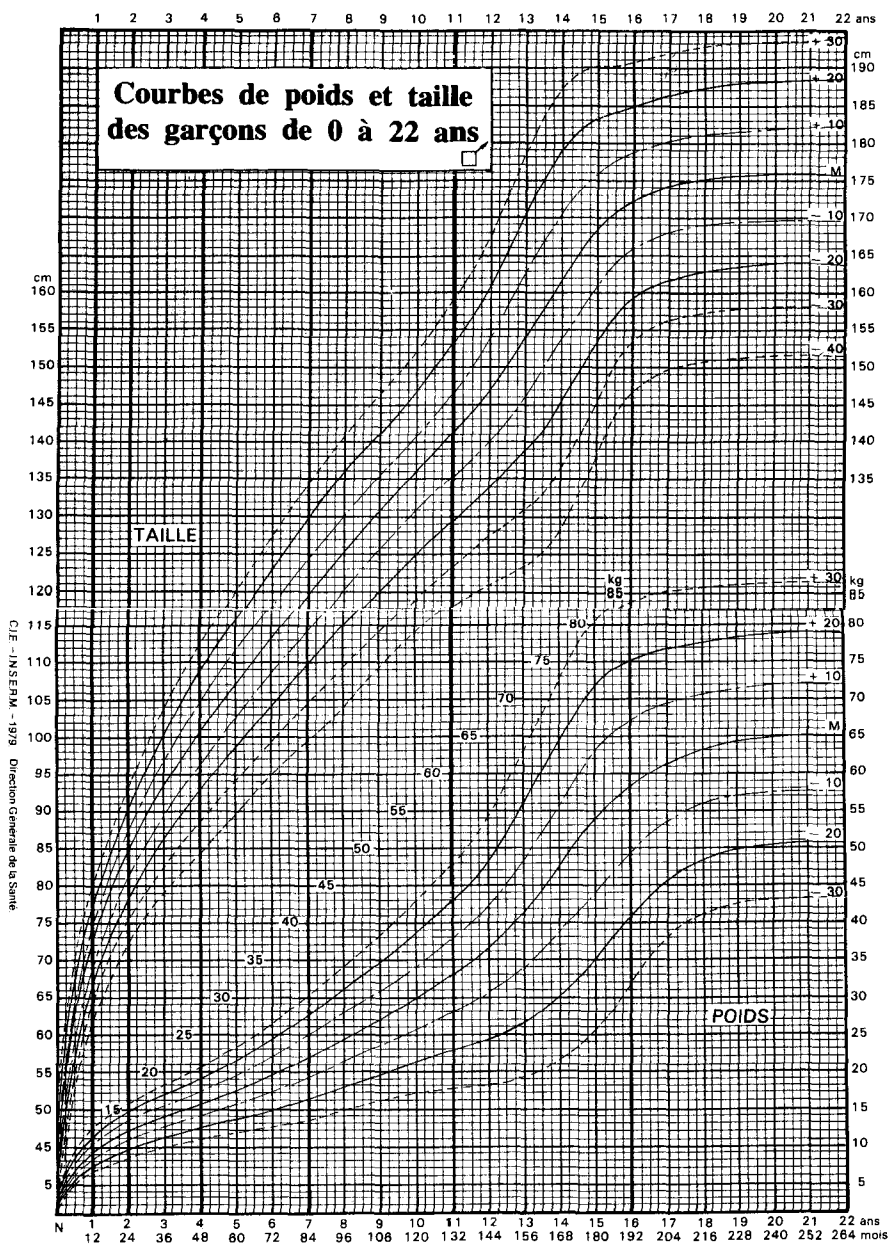
1985 :
l'introduction
des concepts
statistiques,
moyenne et
écart type

En 1985, la zone de normalité est établie cette fois par la courbe des valeurs moyennes encadrée par une courbe des valeurs maximales correspondant à $+2\sigma$ et une courbe des valeurs minimales correspondant à -2σ (document 3). Ces courbes sont réalisées aussi d'après les travaux de M. Sempé en 1965. Il y a donc

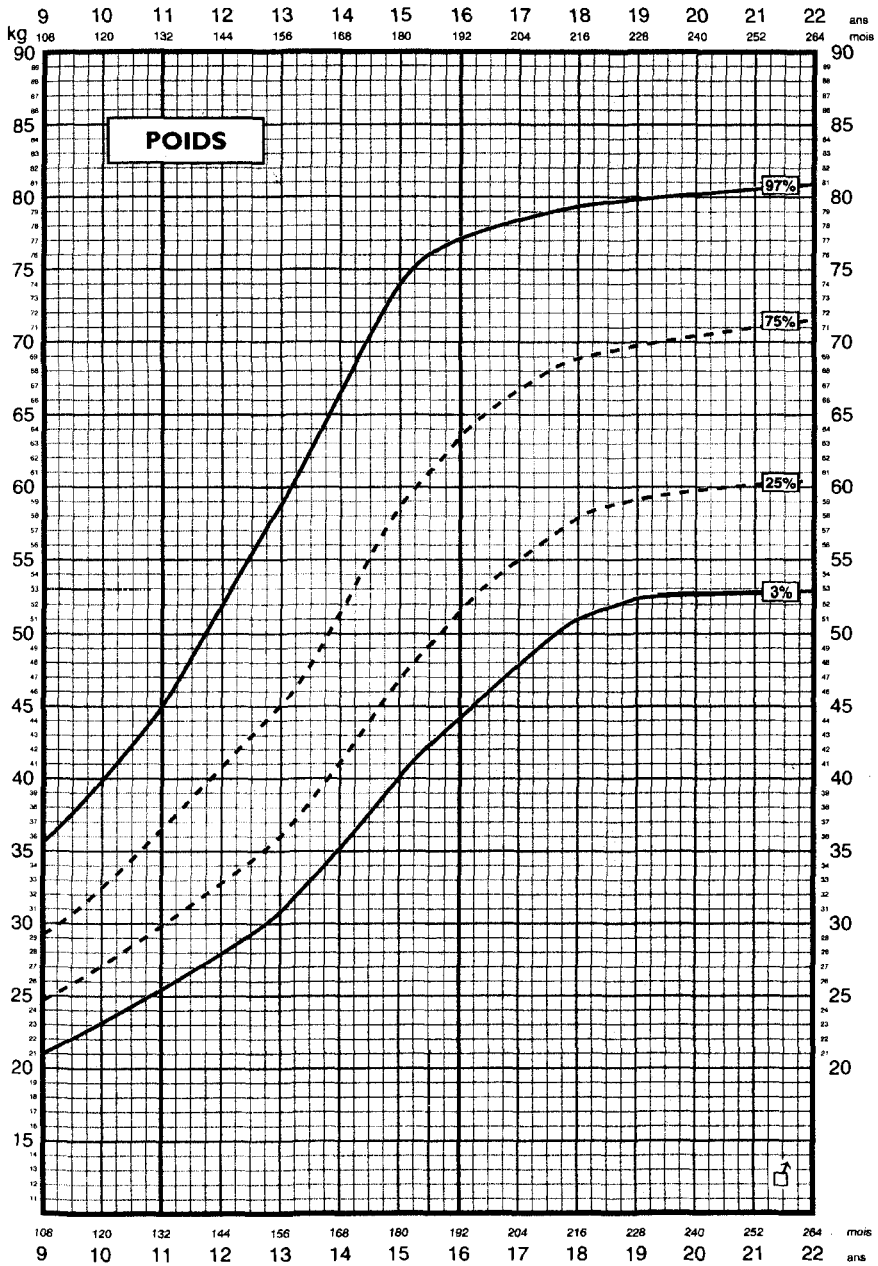
**Document 3. Croissance somatique des garçons de la naissance à 19 ans
Carnets de santé (1985)**



Document 4. Courbe de poids et taille des garçons de 0 à 22 ans
Carnets de santé (1991)



**Document 5. Croissance somatique des garçons de 9 à 22 ans
Carnets de santé (1995)**



Tracés établis en CENTILES modélisés J.P.P.S. C.S. - Pr. M. SEMPE 1995

ici un long décalage de temps avant leur insertion dans les carnets de santé. Les concepts de moyenne et d'écart type, que nous définirons plus loin, sont empruntés aux mathématiques statistiques mais ne sont pas expliqués dans le carnet donné aux parents.

1991 :
des encadrements
de plus en plus
détaillés
de $+ou - 1$,
2 ou 3σ

En 1991, la courbe moyenne est encadrée par trois courbes de part et d'autre, correspondant à $+ ou - 1$ écart type, à $+ ou - 2$ écarts types et à $+ ou - 3$ écarts types. La même représentation est également utilisée dans le dossier médical scolaire mis en place cette même année dans les collèges (document 4 : INSERM, 1979). Nous remarquons que les courbes sont nommées : $+ 10$, $+ 20$, $+ 30$ au lieu de $+ 1 \sigma$, $+ 2 \sigma$, $+ 3 \sigma$ ce qui serait vraisemblablement le résultat d'une erreur de copie σ étant confondu avec un zéro.

1995 :
passage à
une expression
en centiles...

Depuis 1995, le tracé des graphiques est établi en centiles (on dit aussi percentiles). C'est ainsi que les quatre courbes tracées, sont appelées : "3 %, 25 %, 75 % et 97 %", correspondent respectivement au troisième, au vingt-cinquième, au soixante-quinzième et au quatre-vingt-dix-septième percentiles (document 5 du Pr. M. Sempé). Pour obtenir, les centiles, la population de référence a été dénombrée puis rassemblée par ordre de taille (ou masse) croissante, puis divisée en cent groupes de même effectif ; chaque groupe ainsi obtenu constitue un centile. Les auteurs pensent peut-être que la notion de pourcentage est plus "parlante" pour les enfants et les parents.

• **Des courbes représentant l'évolution de la corpulence**

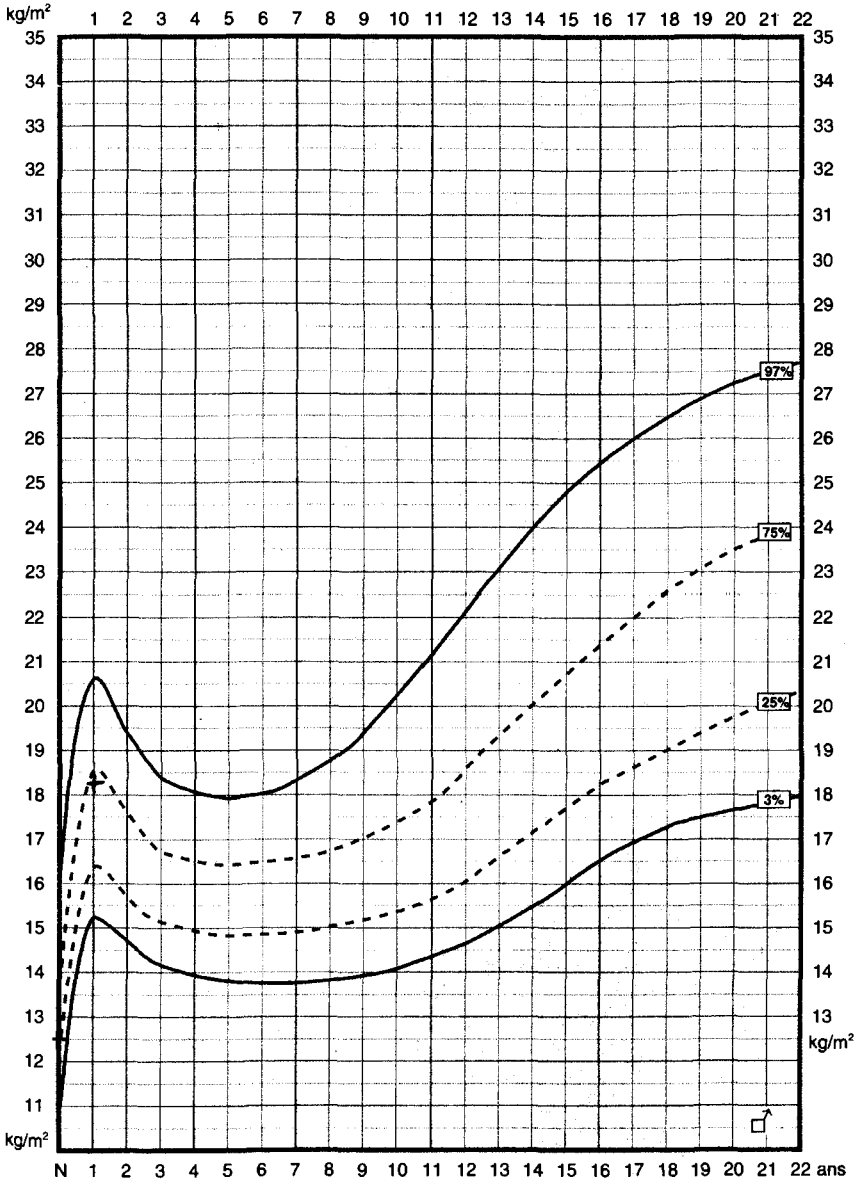
Dans les carnets de 1995 les deux variables de la croissance, jusqu'alors séparées, sont reliées par la corpulence exprimée par l'Indice de Masse Corporelle (IMC) ou indice de Quételet. C'est un indice que l'on calcule en divisant la masse (en kg) par le carré de la taille (en m). Les variations de l'IMC sont encadrées par les 25^e et 75^e percentiles, puis les 3^e et 97^e percentiles. La courbe "augmente" la première année, puis "diminue" pendant quelques années et "augmente à nouveau". L'âge de la remontée, qui est appelé "rebond d'adiposité", se situe vers six ans (document 6).

... et
évaluation de
la corpulence
par l'indice
de Quételet

2. EXPLICITATION DES TERMES STATISTIQUES LUS DANS LES CARNETS DE SANTÉ

L'individu ne peut savoir s'il est normal que s'il se compare aux autres individus dans une population. C'est grâce aux outils mathématiques statistiques que la comparaison sera possible.

**Document 6. Évolution de la corpulence chez les garçons au cours de la croissance
Carnets de santé (1995)**



Tracés établis en CENTILES modélisés - Dr. M.-F. ROLLAND-CACHERA et Pr. M. SEMPE - 1995

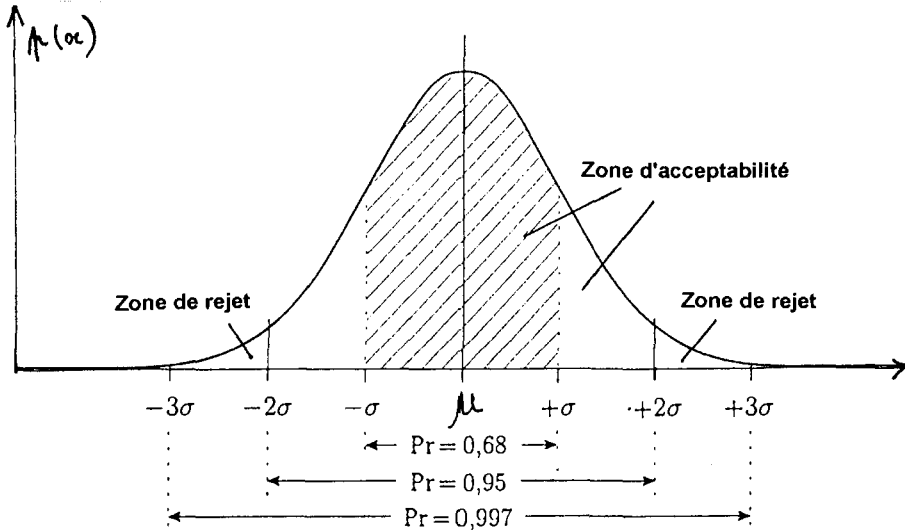
2.1. Moyenne et écart type, paramètres décrivant une répartition obéissant au modèle théorique de la loi de Gauss

La taille et le poids dépendent de facteurs génétiques et de facteurs du milieu. En négligeant, les facteurs du milieu, nous pouvons supposer l'intervention d'au moins sept gènes existant chacun sous deux formes alléliques. Les probabilités des différentes combinaisons alléliques sont données par le développement du polynôme $(A + a)(B + b)(C + c)$ etc. Le calcul devient vite difficile. La loi de Gauss est alors une approximation suffisante du développement de ce polynôme quand n est supérieur à 7. Nous disons ainsi que les variations quantitatives de la taille et de la masse "obéissent" à la loi de distribution normale de Gauss (document 7). La représentation graphique de la population se présente comme la surface comprise entre la courbe "en cloche" et l'axe des abscisses. On peut définir deux paramètres caractéristiques : la moyenne et l'écart type. Tous les élèves savent calculer leur moyenne, quant à l'écart type il correspond aux points d'inflexion de la courbe de part et d'autre de la moyenne.

Dans une population normalement distribuée, 68 % de toutes les variations dues au "hasard" se trouvent dans l'in-

en rapport avec les probabilités des différentes combinaisons alléliques intervenant dans la taille et le poids : la loi de Gauss

Document 7. Représentation graphique de la loi de Laplace-Gauss



Loi de Laplace-Gauss. On a représenté les probabilités affectées à quelques intervalles autour de la moyenne. Ainsi la probabilité d'un écart inférieur à σ correspond à la surface hachurée soit 0,68.

On pourra retenir que selon cette loi, la probabilité d'un écart absolu inférieur à 2σ est 0,95.

zone
d'acceptabilité
limitée par
2 écarts types
de part et
d'autre de
la moyenne

tervalle [moyenne + ou - 1 écart type], 95 % se trouvent dans l'intervalle [moyenne + ou - 2 écarts types] et 99,7 % dans l'intervalle [moyenne + ou - 3 écarts types].

Cette représentation est un modèle explicatif à condition de bien lire la surface comprise entre la courbe, l'axe des abscisses et les limites que l'on vient d'indiquer. En statistiques inférentielles, on distingue la zone d'acceptabilité délimitée par la courbe de Gauss et l'intervalle [moyenne + 2 écarts types ; moyenne - 2 écarts types], laquelle correspond à la zone de normalité. Au-delà de ces limites, on définit deux zones de rejet ou "hors norme". Cette représentation fixe les limites de la normalité, c'est donc un modèle explicatif, qui devient normatif.

En réalité, les distributions des tailles et des masses dans une population d'enfants provenant de travaux empiriques effectués par des médecins ne correspondent pas exactement à ce modèle théorique car les populations ne sont pas homogènes, divers facteurs du milieu interviennent et tous ces facteurs ne sont pas indépendants les uns des autres. Or la loi statistique implique des événements indépendants les uns des autres.

2.2. Médiane et interquartile, autres paramètres descripteurs d'une distribution dans une population

les centiles,
nouvelles
divisions d'une
population

Les individus de la population de référence sont mesurés. Puis la population est dénombrée et rassemblée par ordre de taille (ou de poids) croissante. Comme nous le précisions précédemment cette population est alors divisée en cent groupes de même effectif. Chaque groupe constitue un centile. La médiane (percentile 50) est la valeur de la taille qui permet de diviser la population en deux parties de même effectif. L'interquartile comprend la population entre le 25^e et le 75^e percentile (soit un quart et trois quarts), c'est le paramètre de distribution.

3. LES LIMITES DU NORMAL

3.1. Origine des populations de référence et valeurs limites de la normalité

Les courbes de référence construites par Sempé, Roy et Pédrón ont été établies d'après l'observation de la croissance de 588 enfants nés entre 1953 et 1955 dans les quartiers sud de Paris et de la banlieue avoisinante (Mondiet-Colle, 1989, p. 63). Ces enfants ont été suivis depuis la naissance jusqu'à l'adolescence. Ces travaux d'auxologie, qui est la science des mensurations, sont les seuls disponibles en France. Les

les limites de la normalité comprennent 95 % d'une population à répartition gaussienne

limites du domaine de la normalité sont celles qui regroupent 95 % d'une population (zone d'acceptabilité) à répartition gaussienne. Cette enquête empirique serait un modèle acceptable si la population étudiée était homogène quant au sexe, quant à l'âge, quant à l'origine ethnique des enfants, ce qui n'est apparemment pas le cas. Peut-on donc étendre ce modèle à l'ensemble de la France ?

De nombreux auteurs se sont interrogés sur les limites à tracer entre le normal et le pathologique. Il n'y a pas de consensus dans le monde médical. Ces limites sont conventionnelles et résultent d'un choix.

3.2. La taille

définition du nanisme et du gigantisme

En ce qui concerne la taille, on parlera d'insuffisance staturale lorsque la taille est comprise entre -2 et -4 écarts types, et d'excès statural lorsque la taille est comprise entre $+2$ et $+4$ écarts types. On définira le nanisme pour des tailles inférieures à la valeur "moyenne -4 écarts types" et le gigantisme pour des tailles supérieures à la valeur "moyenne $+4$ écarts types" (Mondiet-Colle, 1989). On pourra pallier l'insuffisance staturale par la prise d'hormone de croissance humaine.

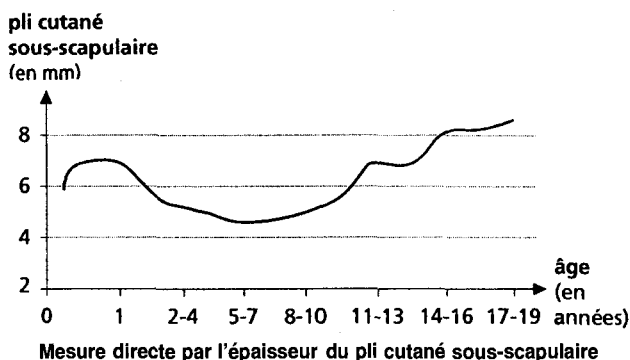
3.3. Le poids et la corpulence

C'est la corpulence, relation entre la taille et la masse, qui permet de repérer l'obésité qui pose un problème de santé publique, d'autant plus qu'un enfant obèse risque de le rester à l'âge adulte. L'indice de corpulence IMC, qui varie comme l'épaisseur du pli cutané sous-scapulaire, est une bonne évaluation de l'adiposité d'une personne. Il permettra de définir graphiquement une zone de surpoids et une zone d'insuffisance pondérale (document 8).

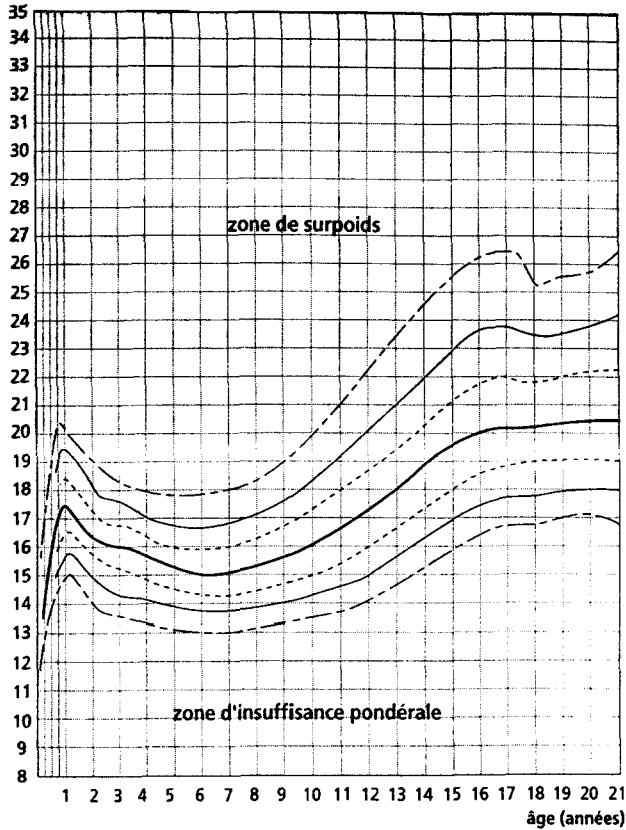
• Chez l'adulte

Voici un exemple d'utilisation chez l'adulte de l'IMC. On peut classer cette variable quantitative en cinq classes : si l'IMC

Document 8. Évolution de l'adiposité



Document 8. Évolution de l'adiposité



Mesure indirecte par la variation de l'indice de masse corporelle

D'après *La nutrition humaine. La recherche au service de la santé*. Desjeux J.-F., Hercberg S., coll. "Dossiers documentaires". Paris : INSERM/NATHAN, 1996, p. 101 et p. 127.

indice de masse corporelle :
variable
quantitative
ou qualitative ?

est inférieur à 19, le malade est classé comme maigre; quand l'IMC est compris entre 19 et 24, le malade est normal; entre 24 et 27, le malade est un obèse modéré ; entre 27 et 30, il est obèse ; et au-dessus de 30, c'est un obèse sévère. (Dougados, 1996). Les valeurs de cette variable peuvent être réparties en trois classes : maigre, normal, obèse, ou en deux classes : "obèse - oui" et "obèse - non" (qui regroupe maigre et normal). Un consensus médical fait que la variable quantitative de l'IMC est transformée en variable qualitative "obésité" (Dougados, 1996). On peut également diviser la variable quantitative soit en quartile, ce qui aboutit en variables qualitatives en quatre classes, soit en deux classes : mesures au-dessous et mesures au-dessus de la médiane.

• Chez l'enfant

“Chez l'enfant s'ajoutent les variations liées à la croissance. Pendant l'enfance, on observe des variations moyennes 'normales', des variations individuelles transitoirement différentes de la moyenne et enfin des évolutions anormales...” (Rolland-Cachera, 1995). La courbe moyenne de variation de la corpulence permet de suivre la croissance de l'enfant. Si ce rebond se produit plus tôt, des travaux ont montré qu'il est possible de prédire une obésité chez l'adulte (Rolland-Cachera, 1995).

Or, d'après Momas (Université Paris-Descartes, 1996), un petit parisien sur quatre présente un excès pondéral et un sur six, une obésité, soit 5 à 6 fois plus que dans les populations de référence étudiées par Sempé en 1979. Ce sont les résultats d'une enquête réalisée auprès de 621 élèves parmi les 13 399 des classes de CM2 à Paris, par la DASS (Direction de l'Action Sanitaire et Sociale).

Mais se pose le problème de la définition de l'obésité à cause de la grande variété des critères considérés et des seuils retenus : *“Est souvent considéré comme obèse un enfant dont le poids observé dépasse de deux écarts-types la valeur de référence (la moyenne) [Locard (1989), Lelingue (1992), Elcarte-Lopez (1993)]. Les auteurs qui ont recours à l'indice de Quételet retiennent aussi parfois le percentile 95 [Mafféis (1988), Westrate (1989), Broussard (1991), Pawson (1991)] ou d'autres percentiles : le percentile 90 [Chinn (1987), Agrelo (1988), Kniskhowy (1989), Nuutinen (1991), Rolland-Cachera (1992), Delisle (1994)] ou le percentile 97 [Rolland-Cachera (1992), Elcarte-lopez (1993)].”* (Momas, 1998)

prédiction
de l'obésité,
problème de
santé publique

4. PROPOSITION D'ENSEIGNEMENT

Nous proposons de suivre avec les élèves le cheminement des médecins-chercheurs qui a abouti aux constructions des courbes de référence des limites de la normalité.

4.1. Les mesures et le calcul de la moyenne arithmétique

Voici le relevé de 55 tailles d'élèves de classe de 3^e pris globalement, sans distinguer le sexe, ni l'âge :

Les valeurs sont données en cm :

155 158 162 167 152 148 172 159 187 169 165 152 147
164 170 170 174 159 155 157 152 164 165 171 172 185
148 151 160 158 143 154 172 181 169 154 162 165 15
153 151 155 173 171 166 150 152 163 164 149 154 161
163 169 173

La moyenne arithmétique est le quotient du total des mesures par le nombre d'individus, soit : $8885 \text{ cm} : 55 = 161,5 \text{ cm}$.

mesurer et
dénombrer :
première étape
de la
scientificité

4.2. Classement, dénombrement et repérage de la médiane

Il s'agit de classer les tailles par ordre croissant et de compter le nombre d'élèves pour chaque mesure. Cette étape constitue la première étape de la scientificité.

| | | | | | | | | |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Taille | 143 | 144 | 145 | 146 | 147 | 148 | 149 | 150 |
| effectif | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 151 | 152 | 153 | 154 | 155 | 156 | 157 | 158 | 159 |
| 2 | 4 | 1 | 3 | 3 | 0 | 1 | 2 | 2 |
| 161 | 162 | 163 | 164 | 165 | 166 | 167 | 168 | 169 |
| 1 | 2 | 2 | 3 | 3 | 1 | 1 | 0 | 3 |
| 171 | 172 | 173 | 174 | 175 | 176 | 177 | 178 | 179 |
| 2 | 3 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 181 | 182 | 183 | 184 | 185 | 186 | 187 | 181 | 182 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 |

La médiane est la valeur du caractère pour laquelle il y a autant d'observations plus grandes que d'observations plus petites. Cette définition peut être donnée aux élèves. 55 valeurs observées étant rangées par ordre croissant et numérotées de 1 à 55, la médiane de ces 55 valeurs est la valeur de rang $(55 + 1) : 2 = 28$; c'est donc 162 cm.

4.3. Premier classement des tailles (de 5 en 5 cm). Histogramme. Polygone des effectifs. Courbe

• Classement

de l'influence
de l'amplitude
du classement...

La présentation des données est améliorée en groupant les valeurs par intervalles de 5 cm d'amplitude. Ces intervalles s'appellent des classes dont la répartition figure dans le tableau suivant. Rappelons que le milieu ou le centre d'une classe est la moyenne des valeurs extrêmes de la classe.

| | | | | |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Classe | [140 ; 145[| [145 ; 150[| [150 ; 155[| [155 ; 160[|
| Milieu | 142,5 | 147,5 | 152,5 | 157,5 |
| Effectif | 1 | 4 | 12 | 8 |

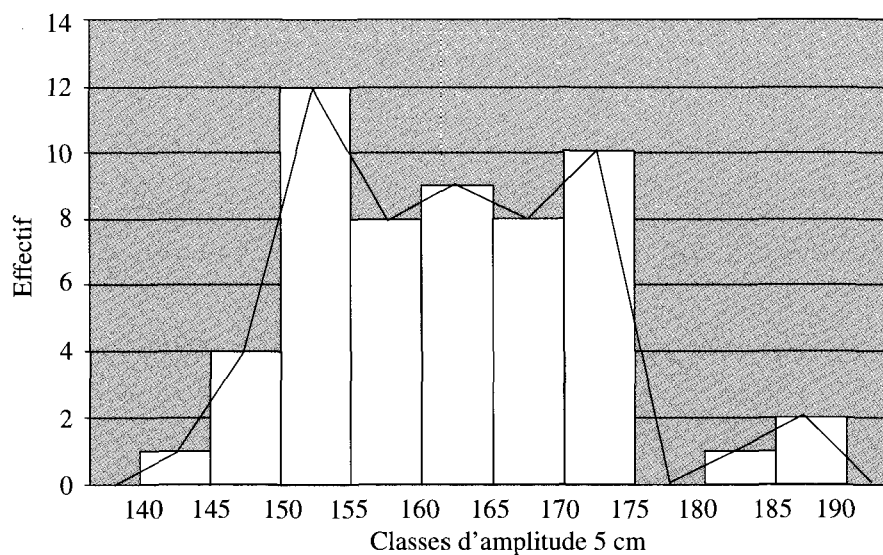
| | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| [160 ; 165[| [165 ; 170[| [170 ; 175[| [175 ; 180[| [180 ; 185[| [185 ; 190[|
| 162,5 | 167,5 | 172,5 | 177,5 | 182,5 | 187,5 |
| 9 | 8 | 10 | 0 | 1 | 2 |

Grâce à ce classement, nous gagnons en lisibilité, mais nous perdons en précision. Nous ne reconnaissons plus les tailles individuelles.

• **Tracé de l'histogramme**

À partir de ce classement, les élèves dessinent l'histogramme (document 9) de répartition de la population selon les classes d'amplitude de 5 cm. Ils sont invités à colorier chaque rectangle avec une couleur différente. La surface de chaque rectangle représente une classe de la population étudiée.

Document 9. Répartition des tailles selon les classes d'amplitude de 5 cm



• **Tracé du polygone des effectifs**

Les milieux de chaque classe joints par un segment de droite font apparaître un polygone des effectifs.

... sur la
représentation
graphique

• **Tracé de la courbe empirique**

Les milieux de chaque classe sont rejoints par une courbe. Les deux sommets les plus élevés sont les valeurs modales. Ici il y en a deux traduisant bien l'hétérogénéité de l'échantillon.

• **Bilan de l'apprentissage**

La répartition de la population est bien représentée par la surface délimitée par la courbe et l'axe des abscisses, ce que traduirait concrètement le fait de faire ranger les élèves dans la cour par ordre de taille croissant, ceux de même taille formant une colonne. L'attention est alors attirée sur la "masse" des élèves et non sur le bord des colonnes qui forme une courbe.

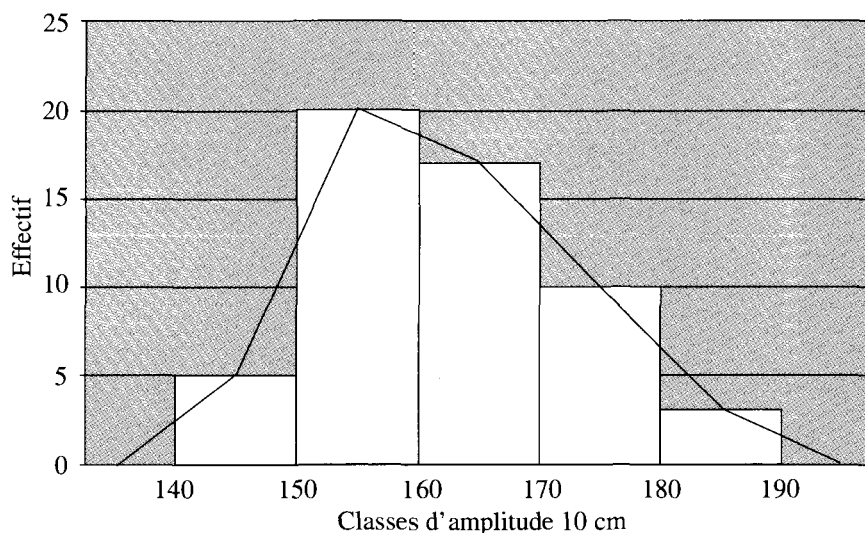
4.4. Second classement des tailles (de 10 en 10 cm)

Les tailles sont regroupées par intervalles de 10 cm d'amplitude.

| Classe | [140 ; 150[| [150 ; 160[| [160 ; 170[| [170 ; 180[| [180 ; 190[|
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Milieu | 145 | 155 | 165 | 175 | 185 |
| effectif | 5 | 20 | 17 | 10 | 3 |

Les élèves tracent l'histogramme, le polygone des effectifs puis la courbe. Cette courbe, qui présente un sommet, s'appelle une "courbe en cloche" (document 10).

Document 10. Répartition des tailles selon les classes d'amplitude de 10 cm



4.5. Comparaison des courbes issues des deux classements

Les élèves observent et comparent les deux courbes : *“la courbe de 5 en 5 est plus précise ; elle est plus réaliste. La courbe de 10 en 10 est moins précise, car c’est une généralité.”* Nous complétons : plus les mesures sont regroupées, plus la courbe s’éloigne du réel. Nous proposons alors la définition du cours de mathématiques : la courbe en cloche est modélisée par la “courbe de Gauss”. La population étudiée se situe dans l’aire entre la courbe et l’axe des abscisses.

4.6. Réalisation d’une maquette en trois dimensions

À partir des tailles relevées sur 147088 filles et garçons des E.U., âgés de 5 à 14 ans, par O’Brien (1941) (Tort, 1974), on trace des courbes en cloche représentant la répartition des mesures à chaque âge pour les filles.

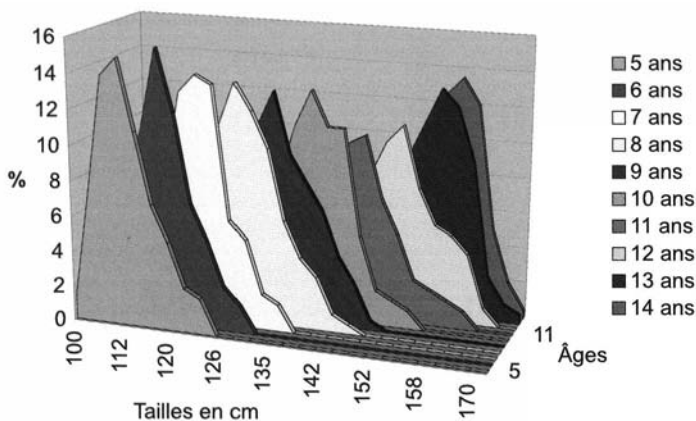
On regroupe toutes les courbes en cloche dans une représentation en trois dimensions.

concrétiser
le concept de
limite par une
représentation
en trois
dimensions

Il s’agit, pour cela, de découper chaque “courbe en cloche” obtenue empiriquement, et de placer les courbes obtenues dans un repère en 3 dimensions : l’axe des x représente l’âge des enfants, l’axe des y représente la taille et l’axe des z représente l’effectif de chaque classe d’âge. Une fois en place, on peut rejoindre les limites maximales par une courbe qui sera la courbe limite maximale des tailles de la population d’enfants de 5 à 14 ans ; puis procéder de la même façon pour tracer la courbe minimale. Ce sont les courbes des valeurs limites maximales et minimales tracées dans les carnets de santé.

Il est possible d’utiliser des logiciels informatiques (Excel, par exemple) pour obtenir une représentation en perspective de la maquette réalisée en classe (document 11).

Document 11. Évolution des tailles par âges (Filles)



5. DISCUSSION AU SUJET DE LA NORME

Par rapport à un caractère biologique, être dans la norme, c'est "être normal". La norme est à l'intérieur des limites. Les valeurs qui sortent de la norme, c'est-à-dire des limites maximales et minimales, sont anormales, pathologiques, hors norme.

5.1. Quelques définitions

- **Variabilité, variable, diversité**

Selon le dictionnaire Larousse (1989), *la variabilité* est un état, une nature, une propriété de ce qui est variable ; c'est aussi l'aptitude à varier ou à subir des variations.

Associé à ce nom, *l'adjectif variable* signifie qui peut varier ; *le nom, une variable*, en statistique est une grandeur susceptible de varier dans un ensemble donné, et telle qu'à chaque valeur prise par cette grandeur puisse correspondre au moins théoriquement, un effectif des personnes ou une fréquence en pourcentage. La variabilité individuelle se traduit par un *polymorphisme* dans les populations, dans lesquelles coexistent plusieurs types génétiques différant les uns des autres par des caractères phénotypiques, à l'origine de la *diversité*. Ce sont les valeurs déterminant les limites de la variabilité qui posent problème. C'est l'objet d'étude de la biométrie ou science des variations biologiques.

- **Normal**

À l'intérieur des limites acceptables de la variabilité du vivant humain, se trouvent des valeurs normales. En latin, *normalis* vient de *norma* qui signifie équerre, règle. Dans le dictionnaire Larousse (1989), nous lisons plusieurs niveaux de définitions, pour *l'adjectif normal*, un niveau mathématique, "*conforme à une moyenne considérée comme norme (avoir une taille normale) selon la loi de Laplace-Gauss*" et d'autres définitions sociales "*conforme à la nature d'un être, conforme au plus habituel, conforme à ce que l'on pense être juste*".

- **La normale**

Elle correspond, au sens commun, à ce qui est normal, courant, à la moyenne, à une situation habituelle. En météorologie, "la normale saisonnière" est identifiée à la moyenne d'un élément météorologique (température, pluviosité, nébulosité) établie sur une période de 30 ans sans que l'on précise la variabilité possible autour de cette moyenne.

- **La normalité**

C'est un état, un caractère de ce qui est conforme à la norme, ce qui est considéré comme l'état normal.

beaucoup
de mots...

• **La norme**

C'est la règle, le principe, le critère auquel se réfère tout jugement ; c'est aussi l'ensemble des règles de conduite qui s'imposent à un groupe social. Ce terme n'est pas simplement descriptif, il implique la volonté de rendre conforme, de normaliser.

• **La normativité**

Est normatif celui qui émet des jugements de valeur et qui institue des règles ou des principes et la nécessité de s'y conformer soi-même en tout premier lieu. Canguilhem utilise ce terme pour concevoir l'activité des êtres vivants. Le vivant tend à s'autonomiser par rapport à son milieu, mieux même il crée son milieu et ne se contente pas de le subir. On dit qu'il est normatif.

• **La pathologie**

C'est l'étude des maladies ou c'est l'ensemble des signes morbides caractéristiques d'une maladie. Dans le sens commun, pathologique se dit d'un comportement anormal, étrange qu'on assimile à une maladie (Larousse, 1989). H. Péquignot (Encyclopædia Universalis) signale : *"il ne faut pas s'étonner de l'illusion commune, selon laquelle... l'état normal serait un état définissable et descriptible à partir duquel on pourrait considérer la... pathologie comme une déviation... le normal prend un sens statistique"*.

Tout se passe comme si la seule définition scientifique reconnue des limites entre le normal et le pathologique était celle provenant des paramètres de la courbe de Gauss. Bien que d'apparence scientifique, ces limites résultent d'un choix de société, en un lieu donné et une période définie. Créer une dictature des normes serait l'effet pervers de l'existence de ces repères flous et fluctuants.

5.2. La norme est la moyenne statistique

C'est à Quételet (1796-1874), précurseur des statisticiens, dont la vocation était plutôt artistique au début de sa carrière que nous attribuons les premières mesures de la taille et du poids de l'homme. Quételet se référant à des statistiques françaises (Hargenvilliers, 1917), à des statistiques belges, italiennes et américaines, à partir des mesures des tailles construit des distributions de tailles dans des populations (M. Tort, 1974, pp. 97 et 98). Il observe que les tailles se répartissent de façon symétrique par rapport à la moyenne ; cette représentation est la même que celle de la loi de Gauss. Il prétend avoir démontré empiriquement cette loi pour la répartition d'un caractère biologique mesurable comme la taille (*Sur l'appréciation des documents statistiques, et en particulier sur l'application des moyennes*, 1844). Ainsi est élaborée la théorie de "l'homme moyen" : *"La preuve de l'existence d'un homme moyen, dans un climat donné, se trouve*

... autour
d'un concept

Quételet et
la théorie de
"l'homme
moyen"

dans la manière dont les nombres obtenus pour chaque dimension mesurée se groupent autour de la moyenne... la moyenne de la taille dans un groupe est telle que le plus grand des sous-groupes formés d'hommes ayant la même taille approche le plus de la moyenne."... "Il identifie dans sa notion de moyenne véritable les notions de fréquence statistique et de normes, car une moyenne déterminant des écarts d'autant plus rares qu'ils sont amples, c'est proprement une norme."

Dans la zone d'acceptabilité se trouve la valeur moyenne du caractère mesurable, ainsi que sa dispersion. Ce sont les représentations des carnets de santé. Vouloir que, dans une population, comme dans la représentation de la loi de Gauss, 95 % de celle-ci "entre" à l'intérieur des limites montre que la société est normative. La volonté de se conformer à cette norme implique le risque de vouloir être normal à tout prix, ce qui pourrait constituer une "normopathie" (Cyrulnik).

5.3. L'anormal est une nouvelle norme

Selon Canguilhem (1966) *"le pathologique doit être compris comme une espèce du normal, l'anormal n'étant pas ce qui n'est pas normal, mais un autre normal"*. Il s'agit *"d'être aussi normatif dans cette situation"* d'anormalité... et d'avoir *"la possibilité de dépasser la norme qui définit le normal"*... et aussi *"la possibilité de tolérer des infractions à la norme habituelle"*. Ainsi *"l'idée de normalité cesse d'apparaître comme celle de la conformité à un idéal extérieur"* ou à une norme imposée. L'être vivant est et doit être normatif en créant ses conditions de vie.

5.4. La norme peut aussi être un modèle idéal à imiter

- ***Le modèle idéal esthétique imaginé par quelques artistes***

La norme pourrait ressembler au modèle idéal de Léonard de Vinci (1452-1519) : l'homme aux proportions idéales, lorsqu'il écarte les bras, est inscrit dans un cercle et dans un carré. De même Ingres (1780-1867) n'hésite pas à embellir la grande Odalisque (1814, Musée du Louvre) en allongeant la longueur du dos, par trois vertèbres surnuméraires. Ses contemporains lui auraient reproché cette erreur sur le plan anatomique. Par contre Courbet (1819-1877) dessine des femmes plutôt "rondes et bien en chair". L'idéal du corps féminin n'a pas toujours été le corps grand et mince comme à la fin du XX^e siècle.

- ***Le modèle idéal à imiter***

D'abord, pour se vêtir, les magasins de vêtements féminins proposent des vêtements à "taille unique" dont la taille ne dépasse pas le "44" selon les normes françaises ; ces vêtements sont prévus pour une norme correspondant à des

évolution
dans le temps
du modèle idéal

femmes grandes et minces. Du reste, il existe à côté de ces magasins "ordinaires", des magasins "grandes tailles" spécialisés dans le "hors norme" imposé par la société marchande. Ces vêtements de taille supérieure au "44" chez les femmes sont aussi vendus plus chers. Pour vivre sans trop dépenser d'argent, il faut être dans la norme corporelle mince.

Beaucoup de jeunes filles veulent être minces et grandes afin de devenir mannequin ou pouvoir participer à des concours de "beauté". Être élue "Miss", avec 50 kg et 1,80 m de mensurations, est une grande fierté. Du reste, les garçons ont aussi leur modèle esthétique, les "Chippendales".

le danger du
modèle à imiter

L'existence de ces normes peut avoir des conséquences sur le comportement alimentaire : par exemple, faire des régimes stricts, même si on est dans la norme moyenne, avec le risque d'anorexie dite mentale. À l'opposé, le comportement boulimique, c'est-à-dire manger tout aliment sans contrôle possible, par compulsion, risque d'amener une obésité. Le jeune aujourd'hui doit trouver sa place entre ces deux pôles : la beauté, synonyme de grande taille et de minceur, et l'obésité. Il est sollicité par les publicités d'aliments : d'un côté les aliments allégés qui donnent la forme et l'énergie, tout en permettant de rester mince, et de l'autre les mets crémeux et savoureux pour un plaisir gustatif, mais qui font grossir.

L'obésité est un problème de santé publique. Selon la définition de Lévy (1994), la santé publique est une discipline dynamique dont l'objet est d'améliorer en permanence la santé des populations. Le concept de santé est relatif à une personne et il faudrait définir la santé d'une population.

5.5. Les limites de la normalité

"Entre le normal et le pathologique, il est bien difficile de trouver la frontière" (Ricœur). Celui qui n'est pas dans la norme risque de basculer dans le pathologique. Alors, *"la science va consacrer tous ses efforts à corriger un caractère pathologique... Voilà un nain hypophysaire. Manifestement, c'est un handicap, c'est une pathologie. L'hormone de croissance va permettre de corriger ce handicap. Mais cette hormone ne fait pas grandir que les nains, elle fait grandir tous ceux qui ont une insuffisance de stature. Où est la limite ? où est la taille idéale ?"* (R. Sautier, *Dossier Phosphore*, 1990). Or, l'hormone de croissance humaine, produite par les bactéries *Escherichia coli* dans lesquelles on a greffé le gène de l'hormone de croissance humaine, est disponible sur le marché avec le risque de prescription abusive.

les limites
de l'utilisation
de l'hormone
de croissance

Ces limites ont changé dans le temps et les enfants d'aujourd'hui sont plus grands que par le passé. Les enfants actuels, mieux nourris quantitativement que leurs aînés, seraient plus gros. Mais l'organisme de l'enfant en croissance dispose d'un système de régulation qui fait que l'enfant

grandit. Le résultat, c'est le maintien d'un équilibre corporel entre la taille et le poids. Puis cette possibilité de régulation disparaît chez l'adolescent (Rolland-Cachera, 1995).

CONCLUSION

À la question des élèves à propos de la taille et du poids : "suis-je normal ?" il est bien difficile pour un enseignant de répondre de manière simple et satisfaisante uniquement à partir de son savoir biologique. Les carnets de santé présentent des références graphiques de la taille et de la masse au cours de la croissance. Dans notre société, ce document est remis à la mère, à la naissance de l'enfant sans "mode d'emploi". En examinant de plus près les carnets de santé des dernières décennies, nous constatons une évolution depuis des indicateurs de croissance simples, analytiques, séparés et individuels (la taille et le poids) ayant un rôle descriptif, puis normatif, vers un indicateur unique plus global, qui intègre divers facteurs (la corpulence) et qui prend un rôle prédictif. Ces indices situent l'enfant dans une population et tracent des limites floues, évolutives et ne recueillant aucun consensus de la part du monde médical. Cependant le dernier indice ne se limite plus à décrire un état et à tracer une limite, il permet la prédiction de l'obésité chez l'adulte futur.

les concepts
statistiques,
des outils
de sélection ?
d'où l'importance
d'une réflexion
philosophique

Par ailleurs, les statistiques inférentielles interprètent en délimitant une zone d'acceptabilité qui regroupe 95 % de la population. Donc, par définition, 5 % d'une population se trouve rejetée et les concepts statistiques deviennent alors des outils de sélection. Les carnets de santé, dans lesquels la moyenne est une norme, font réapparaître la théorie de l'homme moyen élaborée par Quételet en 1844. Il est difficile d'enseigner cela aux élèves sans l'aide d'une réflexion philosophique. La difficulté est d'ordre sémantique : la diversité de sens des mots gravitant autour du concept est révélatrice. Par ailleurs, la position philosophique de Canguilhem permet d'expliquer que le "hors norme" est une nouvelle norme. Cette vision philosophique doit permettre à chacun de s'accepter tel qu'il est afin de mieux gérer sa vie en créant sa propre normativité. Voilà un message plus satisfaisant que nous pourrions transmettre aux élèves, les citoyens de demain, dans le cadre d'une approche interdisciplinaire.

Monique ARRIGHI
Collège Saint-Thomas de Villeneuve,
Bry-sur-Marne
Lycée Notre Dame des Missions, Charenton

BIBLIOGRAPHIE

- ACOT, P. (1999). Les maîtres de l'école française. In *L'histoire des sciences* (pp. 91-106). Paris : PUF, coll. *Que sais-je ?*
- BELORIZKI, E. (1998). *Probabilités et statistiques dans les sciences expérimentales*. Paris : Nathan Université.
- CANGUILHEM, G. (1965). Le normal et le pathologique. In *La connaissance de la vie* (pp. 154-169). Paris : Vrin.
- CANGUILHEM, G. (1965). La monstruosité et le monstrueux. In *La connaissance de la vie* (pp. 171-184). Paris : Vrin.
- CANGUILHEM, G. (1966). *Le normal et le pathologique* (pp. 76, 95). Paris : Presses Universitaires de France.
- CHAZEL, F. (1990). Normes et valeurs sociales. In *Encyclopædia Universalis* (tome 16, pp. 450,452).
- COQUIDÉ, M. (1996). Réhabiliter la diversité et besoin d'unité en biologie. *Tréma 9-10*, 55-64. IUFM de Montpellier.
- Dossier. (2000). Obésité l'épidémie. *La Recherche*, 330, 30-44.
- DOMENACH, J.-M. (1989). *Ce qu'il faut enseigner*. Paris : Le Seuil.
- DOUGADOS, M. (1996). *La Mesure. Initiation du clinicien au langage statistique et méthodologique*. Paris : Expansion scientifique Française.
- FOUREZ, G. (1996). *La construction des sciences*. Bruxelles : De Boeck Université.
- GIRARD, J.-C. (1998). *Enseigner la statistique du CM à la Seconde. Pourquoi ? Comment ?* IREM de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1.
- GIRAULT, Y. et M. (1999). *L'aléatoire et le vivant*. Paris : Diderot Éditeur, Arts et Sciences.
- GOIX-ALLEGRETTE, M. (1996). *Les concepts de croissance et de développement en biologie. Représentations et obstacles chez les élèves de collège. Propositions didactiques*. Thèse, Université Denis Diderot, Paris 7.
- HELLER, R. (1968). *Manuel de statistique biologique*. Paris : Gauthiers-Villars.
- MATHY, P. (1997). *Donner du sens aux cours de sciences*. Bruxelles : De Boeck Université, coll. *Pédagogies en développement*.
- MOMAS, I. (1998). Prévalence de la surcharge pondérale et de l'obésité chez des élèves de cours moyen 2^e année. Enquête dans les écoles publiques parisiennes. *Cahiers de Chaligny*. Mairie de Paris.
- MONDIET-COLLE, C. (1989). *Le mythe de Procuste. La taille humaine entre norme et fantasme*. Paris : Le Seuil.

- NENNA, A. (1990). Surveiller la croissance. In *Douze clés pour la médecine. Entretiens avec Émile Noël*. Paris : Belin, coll. *Regards sur la science*.
- PÉQUIGNOT, H. (1990). Santé, la normalité physiologique. In *Encyclopædia Universalis* (pp. 577, 583).
- RAMEIX, S. (1996). *Fondements philosophiques de l'éthique médicale*. Paris : Ellipse.
- REGAL, R. (1985). *Motricité humaine. Fondements et applications pédagogiques*. Québec : Presse Université Québec. Paris : Vigot.
- ROLLAND-CACHERA, M.-F. (1995). *L'obésité de l'enfant ; évaluation, prédiction des mesures de l'adulte. Évolution de l'adiposité aux différents âges de la vie*. Paris : INSERM.
- ROLLAND-CACHERA, M.-F. (1996). *Le pôle de la nutrition intra-utérine et du jeune enfant sur le développement*. In *La nutrition humaine. Dossiers documentaires*. Paris : INSERM Nathan.
- RUMELHARD, G. (1995). De la biologie contemporaine à son enseignement. In M. Develay. *Savoir scolaire et didactique des disciplines* (pp. 317, 337). Paris : ESF.
- RUMELHARD, G. (1998). Santé et pouvoir de rétablissement. *Aster*, 27, 125-143. Paris : INRP.
- SCHWARTZ, D. (1994). *Le jeu de la science et du hasard. La statistique et le vivant*. Paris : Flammarion, coll. *Champ*.
- SCHWARTZ, D. (1996). *Méthodes statistiques à l'usage des médecins et des biologistes*. Paris : Flammarion, coll. *Médecine sciences*.
- TORT, M. (1974). Le quotient intellectuel. *Cahiers libres*, 266/267. Paris : François Maspéro.

SCIENCES DE LA VIE, PHILOSOPHIE, SCIENCES HUMAINES

Guy Rumelhard

Le positivisme impose une représentation des savoirs scientifiques dénuée de toute dimension spéculative. L'enseignement des disciplines scientifiques reste aujourd'hui essentiellement opératoire et manipulateur. Les découvertes résultent de la mise au point d'instruments, de techniques, d'observations, de mesures et de calculs. L'objectif semble être de former un ingénieur ou un expert. En biologie, cependant, la prise en compte des représentations qui font obstacle à l'assimilation du savoir, l'irruption des questions éthiques, la nécessité d'articuler le psychique et le somatique, la nécessité d'interpréter les observations, la proximité du médical difficilement séparable du biologique conduisent à se poser le problème du passage de l'un à l'autre et donc à repenser les finalités de l'enseignement biologique. La réflexion philosophique est présente en acte au cœur même de la pensée et de l'enseignement scientifique dans la mesure où l'on ne peut, par exemple, isoler les questions de santé, de normalité et de normativité. La méthode réductionniste, qui est une condition de possibilité des progrès scientifiques, met ces questions provisoirement entre parenthèses, mais une approche réellement culturelle et formatrice doit les réinscrire en amont, en aval et aussi au cœur du travail scientifique.

une inter-
disciplinarité
très large...

...mais intra-
scientifique

Dans l'enseignement scientifique, remettre la science au cœur de la culture consiste tout à la fois à affermir le concept de discipline et à étendre très largement les passages interdisciplinaires indispensables entre éthique, politique, linguistique, ethnologie, psychanalyse, idéologie et biologie. Or dans la recherche biologique, l'interdisciplinarité semble la règle. Dans son travail de recherche le biologiste fait feu de tout bois tant au niveau des outils conceptuels, que des appareils et des techniques de laboratoire. La dissection ou l'opération chirurgicale s'accompagne de produits chimiques (analgésiques, anesthésiques, antibiotiques) mais aussi d'appareils (manomètre, rayons X, ultracentrifugeuse, chromatographie, scintigraphie, microscope) provenant de divers domaines de la physique ou de la chimie. Certains concepts ont également des provenances multiples : mathématiques (probabilité, hasard), technologique (régulation), chimique (énergie, flux, réaction). Les échanges existent également d'une discipline à l'autre à l'intérieur de la biologie. Ainsi les concepts de mutation génétique, ou d'anticorps monoclonal peuvent devenir des outils techniques d'expérimentation. Mais cette *interdisciplinarité* reste *intrascentifique* même quand elle fait appel aux concepts de code, message, erreur, programme, puisque ceux-ci proviennent de la théorie de l'information. L'enseignement reproduit cette interdisciplinarité très libre, mais sans franchir non plus ces limites.

Faut-il donc admettre un partage absolu entre les sciences dites "dures" et les sciences humaines et sociales dites "molles", et *a fortiori* avec la philosophie ou la littérature. Il n'y aurait aucun point commun entre l'emploi en biologie et l'usage littéraire ou courant des termes de *milieu* ou de *métamorphose*. Les débats visant à "remettre la science au cœur de la culture" ne seraient que rhétorique pour discours de tribune. La science est dans la culture comme le noyau dans le fruit !

1. LA DISTINCTION ENTRE SCIENCES DURES ET SCIENCES MOLLES

1.1. Une frontière supposée étanche

Pour réactualiser d'une manière nouvelle le débat sur la distinction entre sciences dures et sciences molles, et lutter contre une tendance actuelle à relativiser cette distinction, le physicien américain Alan Sokal a réalisé un canular qui avait pour lui valeur de preuve expérimentale. Rappelons rapidement de quoi il s'agit. Dans la tradition du faux littéraire, le physicien a fait accepter par le comité de lecture d'une revue américaine intitulée "*Social text*" consacrée à ce que l'on appelle les *cultural studies* un pastiche épistémologico-politique intitulé "*Trangressing the Boundaries : towards a transformative hermeneutics of quantum gravity*". Le texte largement constitué de citations ou de paraphrases d'intellectuels français ayant une influence aux États-Unis contenait également un nombre non négligeable d'erreurs et d'absurdités scientifiques et épistémologiques patentes. Sokal a révélé ensuite sa supercherie et publié un livre qui exploitait de manière plus exhaustive les données et citations sous le titre "*Impostures intellectuelles*" (1). Pour cet auteur les concepts perdent toute signification quand on les extrait de leur contexte précis. Ils deviennent de pures métaphores sans rôle opératoire explicatif ou inventif. Ainsi on peut mystifier un comité de lecture avec des erreurs manifestes, et ceci est censé apporter la "preuve expérimentale" du fait que les procédures de contrôle sont fragiles (2).

Ce faux a déclenché de nombreux commentaires mais n'a pas pour autant tranché définitivement le débat. Bien évidemment, l'auteur pense que le canular inverse est impossible. Il est peu probable de faire accepter par un comité de lecture composé de quelques spécialistes mondiaux d'un domaine

une preuve
expérimentale
de la frontière

franchir
la frontière dans
un seul sens

(1) SOKAL, A., BRICMONT, J. (1997). *Impostures intellectuelles*. Paris : Odile Jacob.

(2) JEANNERET, Y. (1997). Décontamination intellectuelle : l'expérience échoue. *L'Aventure humaine*, 8, 81-89.

précis de la physique un faux manifeste. Les procédures de contrôle font appel à la cohérence conceptuelle et aux vérifications expérimentales. Il existe cependant des domaines de la biologie où la distinction n'est pas aussi immédiatement évidente. Par ailleurs, sans chercher à défendre les intellectuels pris à partie par Sokal, on peut cependant admettre qu'observer les scientifiques comme le font les ethnologues ou les sociologues contribue à souligner les *limites* et les *dérives possibles* du travail réalisé dans les laboratoires. Les travaux du sociologue Bruno Latour, par exemple, critiqués par Alan Sokal, contribuent cependant à montrer que l'activité de recherche s'inscrit dans un environnement social et politique, dans des modes d'organisation et de financement, des stratégies individuelles, des équipes et des institutions qui expliquent les déviations, les blocages, les reculs à un moment donné. Tout ceci est utile et sain, mais ne transforme pas pour autant les résultats scientifiques en simple discours équivalent d'un roman, d'un poème ou d'un mythe. Il existe un travail collectif de théorisation, de mathématisation (quand c'est possible), de discussion critique et d'expérimentation qui confère une validation aux résultats et aux explications scientifiques *indépendamment du contexte*. Exporter, de manière peut-être discutable ou mal informée, hors de leur champ d'origine, certains concepts physico-mathématiques vers les sciences humaines n'invalide pas pour autant tout travail de sociologie qui tente d'importer des concepts. Faut-il faire la chasse aux "*concepts nomades*" ? Implicitement l'auteur soutient aussi la thèse de la *monosémie stricte des concepts* comme source de progrès dans les sciences physico-mathématiques du moins. La polysémie ne serait jamais source de progrès, et si une science humaine utilise les concepts d'une science dure, ceux de la topologie par exemple, c'est nécessairement sans rien y comprendre, ou en les vidant de toute substance.

la scientificité
ne dépend pas
du contexte

la monosémie
garantit
la rigueur

1.2. Une frontière crée des points de passage et d'échange

Tout n'est pas si simple. Particulièrement en biologie il existe des mathématisations erronées, mais, inversement, des modélisations qui ne sont que des métaphores, des domaines "en attente" d'une vérification expérimentale provisoirement impossible, des polysémies qui sont sources de progrès (3). Nous en avons développé des exemples ailleurs. Quant au *relativisme* il peut être soutenu et développé par les scientifiques eux-mêmes. Selon Claude Allègre l'équation de Schrödinger sera un jour dépassée. Il pense que ces équations

(3) MOULIN, A.-M. (1990). Le récepteur en immunologie, polysémie-polyphonie historique. *Aster*, 10, 155-169.

le relativisme
n'est pas une
valeur culturelle

tions sont provisoires (4). Un jour on trouvera des modèles plus performants, plus généraux avec d'autres équations. Ainsi "l'enseignement de la science est celui de l'incertitude". "La valeur culturelle de la science c'est l'enseignement du relativisme comme le montre assez l'histoire des sciences." Ce relativisme historique et mathématique conduit à relativiser la vérité et la réalité, même si cette position s'accompagne d'une réification du fait d'observation, d'une conception des sciences comme radicalement *exogène* par rapport à la philosophie, d'une négation du statut de science à la psychologie. Si l'histoire des sciences écrite dans une perspective épistémologique a un intérêt, c'est d'apporter un regard critique et non pas de soutenir le relativisme. Elle peut montrer que tout concept reste ouvert sur sa propre rectification. Mais ce n'est ni nécessaire ni systématique. Les rectifications successives constituent des approximations. Mais approximation ne signifie pas relativisme.

le critère
heuristique
s'énonce
a posteriori

Un autre auteur tardivement popularisé à partir de la traduction française de son livre préfacé par Jacques Monod et intitulé "La logique de la découverte scientifique" (5) a tenté de proposer un critère de démarcation pour les sciences expérimentales : la possibilité de réfuter une théorie à partir d'observations ou d'expériences. Ce critère a semblé séduisant à de nombreux scientifiques car il semble tracer une limite nette entre les sciences et ce qu'il nomme la métaphysique. Une partie de la biologie en ce qui concerne les théories de l'évolution et une partie de la géologie ne répondent cependant pas à cette possibilité dans la mesure où elles comportent une *dimension historique*. Ce critère de réfutabilité est également séduisant car il peut s'énoncer *a priori*, mais il oublie un deuxième critère réellement historique, qui ne peut donc s'énoncer qu'*a posteriori* : le critère heuristique c'est-à-dire la possibilité d'un *développement du savoir*. L'invention de théories nouvelles guidant de nouvelles expérimentations ou de nouvelles observations prend autant d'importance que la mise au point de procédures de réfutation. Un concept comme celui de régulation (6) ne se limite pas à ce qu'il dit explicitement au moment de son importation en biologie dans le domaine de la thermorégulation. Il entraîne des questions nouvelles dans de nombreux domaines de la génétique des individus et des populations, de l'embryologie, du fonctionnement des organes (cœur, vaisseaux, glandes), des écosystèmes. Ces *développements du savoir contenus dans*

-
- (4) ALLÈGRE, C., FINKIELKRAUT, A., LURÇAT, F. (1996). Promesses et menaces de la science. *Alliage*, 27, 3-12.
- (5) POPPER, K. (1934). *Logik der Forschung*. (1959). *The logic of scientific discovery*. (1973). *La logique de la découverte scientifique*. Paris : Payot.
- (6) SCHNEEBERGER, P. (1992). *Problèmes et difficultés de l'enseignement d'un concept transversal : le concept de régulation*. Thèse, Université Denis Diderot, Paris 7.

le concept initial lui confèrent une extension et une compréhension différentes. Il contribuera par la suite à la constitution d'une science nouvelle, la cybernétique. Ces développements confèrent rétrospectivement une scientificité au concept qui par la suite s'incorporera à toute la culture contemporaine. Les études historiques montrent également qu'il dérive de toute une réflexion en astronomie, en technologie, mais aussi en économie, et, de manière plus inattendue, en théologie (Rumelhard, 1994).

Le canular d'Alan Sokal entraîne également une discussion sur le bon emploi des métaphores. Les concepts des sciences physiques ne doivent pas être utilisés en dehors du contexte précis où ils ont été définis. Les termes de fractale, de chaos, ou la topologie perdent tout leur sens dans un discours de philosophe et ne servent qu'à mystifier le public. Cette position stricte est en quelques sorte "anti-interdisciplinaire". Chacun chez soi ! Mais ici aussi les choses ne sont pas si simples. Autant les mathématiques semblent définir les conditions et les limites de leur emploi, autant les métaphores qui jouent réellement un rôle opératoire ne contiennent pas en elles-mêmes les limites de leur emploi. Leur fécondité se révèle bien souvent *a posteriori*. Très rapidement la cybernétique a prétendu s'intéresser au raisonnement humain et à la possibilité d'une intelligence artificielle. La machine de Turing conduit à élaborer une théorie de l'apprentissage (7). Bien évidemment cette science de l'apprentissage tend à éliminer toute forme de *subjectivité*, de *signification* ou de *symbolique*. Dès les années 50 il se crée une société de pédagogie cybernétique et une revue qui étudient comment transmettre et mémoriser des informations (8). L'apparition de systèmes expert semble légitimer cette importation de concepts et lui donner une certaine consistance. Cette science s'adresse certainement à *l'homme cognitif*, ou plus exactement à *l'homme comportemental*, création du scientisme inventée par les adeptes du cerveau-machine, plus qu'à *l'homme tragique* qui vit son apprentissage et l'exercice de son intelligence sans en éliminer la dimension dramatique. L'apprentissage de la lecture par exemple ne relève pas uniquement d'une technique, il doit également inclure une réflexion sur la richesse du texte lu, sur le fait qu'il "parle" à l'élève, qu'il a un sens pour lui. Il reste alors à se demander si le concept "*d'apprentissage allostérique*" (Giordan, 1989), qui utilise la métaphore des enzymes allostériques qui ont une fonction de régulation en biochimie, est une réactualisation et une rénovation légitime de la pédagogie cybernétique, ou bien une exportation totalement inap-

les métaphores jouent un rôle opératoire mais ne contiennent pas en elles-mêmes les limites de leur emploi...

(7) BOUCHERON, S. (1992). *Théorie de l'apprentissage. De l'approche formelle aux enjeux cognitifs*. Paris : éd. Hermès.

(8) COUFFIGNAL, L. (1963). *La cybernétique*. Paris : PUF.

... et véhiculent
l'idéologie

propriété qui pourrait tomber sous le coup des critiques d'Alan Sokal.

La question inverse mériterait une étude fine, précise et patiente. Quel est "*le rôle des métaphores dans les progrès de la biologie*" (9) ? De même, quel est le rôle des métaphores dans l'enseignement et la vulgarisation du savoir scientifique ? Et en particulier, quel est le rôle des métaphores pour véhiculer l'idéologie au cœur de la société ou au cœur de la science ? Un récent discours de cinquante minutes d'un premier ministre parlant d'économie et de chômage contenait quinze fois le mot régulation.

Sans développer ici ces questions rappelons la conclusion de la thèse de Georges Canguilhem sur "*La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*" en 1955 (10) : "*la notion de réflexe met cent soixante-trois ans, entre le De motu musculari de Willis (1670) et le premier Mémoire de Marshall Hall (1833) à devenir un fait. Au terme de cette période, l'image analogique sur laquelle repose la notion est à la fois familière et oubliée*" (le rayon lumineux réfléchi)... Quand certains auteurs reprochent à Willis de confondre une image et un argument et de croire tenir une preuve quand il a découvert une analogie, Canguilhem fait remarquer que c'est "*témoigner d'une espèce de puritanisme logique selon lequel toute forme d'imagination serait néfaste à la recherche scientifique*". Mais aussi, c'est bien en étant obligé d'avoir recours à ces métaphores, que les scientifiques ne peuvent pas manquer d'être philosophes.

Reprenons maintenant certaines de ces questions méthodiquement, dans les limites de ce court article, pour montrer que, dans l'enseignement scientifique, remettre la science au cœur de la culture consiste tout à la fois à affermir le concept de discipline scientifique et à étendre très largement les passages interdisciplinaires. Nous laisserons les physiciens reprendre pour leurs propres disciplines.

1.3. Se tenir éloigné de la frontière

On peut penser qu'il est possible de se tenir très éloigné de ce débat tant au niveau de la recherche que de l'enseignement et considérer donc qu'il est non avenu. En analysant ou en enseignant la structure des allèles qui déterminent une maladie génétique (polymorphisme, répétition, translocation, transmission en méiose ou en mitose) on n'est pas obligé de se poser la question de la détection prénatale ou préim-

(9) FOX KELLER, E. (1999). *Le rôle des métaphores dans les progrès de la biologie*. Paris : Institut Synthélabo. Traduit de l'anglais.

(10) CANGUILHEM, G. (1955). *La formation du concept de réflexe aux XVII^e et XVIII^e siècles*. Paris : Vrin. 2^e éd. augmentée, 1977.

la question
des échanges
ne se pose pas
nécessairement

plantatoire de ce gène, des conséquences de la généralisation de cette détection à la totalité des naissances dans un pays donné, de l'apparition possible d'un "eugénisme démocratique" si aucun traitement n'existe et si l'avortement ou la non implantation se généralisent, des relations entre un gène et son milieu, ou de la question plus large de l'hérédité de l'intelligence, des autorisations que peut ou non donner la CNIL pour suivre ce gène au cours des générations dans des familles, des conséquences psychologiques de telles maladies génétiques et de leur révélation, des différences entre un réductionnisme méthodologique indispensable et un réductionnisme philosophique, du changement de la vision du monde lié à la génétique moléculaire. Quand on enseigne l'écologie on n'est pas obligé de se demander si la nature est *sauvage* ou *vierge*. Et pourtant les représentations qui guident l'exploitation ou au contraire la préservation de la nature viennent s'ancrer dans ces deux mots. Dans une vision naïvement anthropocentrique, la sauvagerie appelle le redressement et la maîtrise. Au contraire, la nature intacte n'a pas encore été souillée par l'homme, et sa préservation devient un devoir (11). Tout dépend du sens étroit ou large que l'on donne à l'expression de "culture scientifique" et des finalités que l'on fixe à l'enseignement scientifique (12).

tout dépend
des finalités de
l'enseignement

Mais il faudrait immédiatement ajouter que toutes les présentations de l'enseignement de la biologie, même celles qui s'en croient le plus éloignées, adoptent des positions philosophiques implicites, sans le savoir et donc sans le dire. Citer plusieurs maladies cérébrales en évoquant seulement les mécanismes biochimiques de quelques synapses et les drogues qui agissent à ce niveau comme activateur ou antagoniste c'est faire, sans le dire, une place prédominante sinon unique à la psychopharmacologie. Et en proposant une nécessaire standardisation des prescriptions chimiques, les thérapeutiques psychologiques à base de médicaments tendent à exclure la singularité de chaque patient et l'écoute de sa *subjectivité* (13). Aucun manuel de biologie de lycée ne va cependant jusqu'à traiter "d'élucubration fumeuse" les approches philosophiques ou psychologiques des conflits humains. Mais peut-être cela va-t-il mieux sans le dire. L'idéologie a besoin de demeurer cachée. Il y a donc peu de risque de trouver un texte violemment polémique s'appuyant sur des résultats expérimentaux inexplicables tel celui du Dr Escoffier-Lambiotte, autrefois chargée de la chronique médicale au journal "Le Monde" : "c'est un simple sel, le lithium, et non un discours politique, qui a mis fin à l'interminable

l'idéologie
doit demeurer
masquée

(11) LARRÈRE, C. (1997). *Les philosophies de l'environnement*. Paris : PUF.

(12) GIL, D. (1993). *Bachelard et la culture scientifique*. Paris : PUF.

(13) ZARIFIAN, E. (1999). *La force de guérir*. Paris : Odile Jacob.

martyr des psychoses périodiques. Combien suivaient, depuis dix ou quinze ans, des traitements psychanalytiques inopérants... Le plus mauvais service que l'on puisse rendre à la cause psychiatrique est de l'éloigner encore du support objectif – l'étude du système nerveux central – qui devient peu à peu le sien pour en faire un discours – mieux, un argument politico-philosophique où les vrais problèmes ne sont nulle part abordés."

les métaphores
du génome sont
nombreuses

L'enseignement utilise également un grand nombre de métaphores dont le contenu implicite n'est pas innocent. Dans le *séquençage du génome humain* les discours des promoteurs du projet parlent d'un programme qu'il suffirait de déchiffrer pour connaître la "nature" de l'homme. Cette investigation de type naturaliste semble tout simplement viser à lire comme dans un livre l'intégralité des trois milliards de nucléotides comme s'il s'agissait d'un simple texte tout en sachant que moins de 5 % de ces séquences ont un rôle connu. Mais les métaphores disent autre chose. Citons l'escalier en double hélice, structure de soutien et plan de construction, les images mécaniques évoquant des pièces défectueuses, un puzzle géant cassé en petits morceaux dispersés, celle du bricolage, celle de la plomberie (découper, souder, coller, ligaturer), celle de la carte (carte géographique, carte à jouer pour la loterie de l'hérédité), et enfin et surtout la métaphore du programme codé, le décryptage d'un texte (ce qui suppose qu'il serait volontairement crypté pour échapper à la lecture, mais par qui, et dans quelle intention ?). Sans parler de la place centrale des ordinateurs comme outil technique, mais aussi comme modèle et triomphe de la pensée opératoire, interactive, instantanée. Bien évidemment certains scientifiques n'adoptent pas cette attitude mécaniste et naturaliste. Il ne sont pas prêts à admettre que pour connaître il suffit de "voir" ou de "lire". La connaissance du génome relève de "l'exégèse", autrement dit de l'interprétation à partir d'hypothèses et de *vérifications expérimentales indispensables*. La description d'une séquence et sa comparaison avec d'autres séquences dans diverses espèces animales n'y suffisent pas. Quant à l'expression de ce génome elle dépend également du milieu. La métaphore de la recette de cuisine apparaît alors. Il ne suffit pas de disposer d'une recette très précise (le programme génétique), la réussite du plat à cuisiner dépend également de la qualité et de la fraîcheur des ingrédients achetés (14) (le milieu). Mais c'est bien chez Henri Atlan que l'on trouve les critiques les plus radicales de la métaphore du "programme génétique" (15).

le programme
génétique
est aussi une
métaphore

(14) DANCHIN, A. (1999). Interview. In *Le Monde des Débats*, 7, Octobre, p. 23.

(15) ATLAN, H. (1999). *La fin du tout génétique ? Vers de nouveaux paradigmes en biologie*. Paris : INRA.

2. LES FAITS, LES THÉORIES ET LES INTERPRÉTATIONS

2.1. La didacture des faits bruts

Pour de nombreux scientifiques le fait visible observable constitue la source première et dernière de vérité. Source première dans la mesure où le point de départ d'une recherche est bien souvent une observation empirique faite sans idée préconçue, et en physiologie la description empirique des nombreuses maladies qui peuvent atteindre l'homme. Source dernière dans la mesure où, selon Claude Bernard (16), "*en présence d'un fait nouveau bien constaté et en contradiction avec une théorie, au lieu de garder la théorie et d'abandonner le fait, (on) garde le fait étudié et on laisse la théorie, alors même que celle-ci, soutenue par de grands noms, est généralement adoptée*". Cette affirmation, maintes fois reprise depuis, a souvent conduit à penser que les faits bien observés ne périssent jamais, et que, par contre, les théories et les hypothèses sont éphémères. On peut donc soigneusement distinguer et dissocier les faits, les conjectures que l'on peut faire à partir de ces faits et *leur interprétation*. Cette croyance positiviste dans la pérennité du fait brut semble tracer une coupure nette permettant d'enseigner, sans risquer de tomber dans un discours incertain ou vague. La *dictature du fait brut*, le "*hard fact*" de nos modernes anglosaxons conduit bien souvent à la crainte d'émettre des théories fausses, et par un processus puissant d'autocensure, à une quasi interdiction de simplement spéculer, même dans le domaine scientifique, à partir de résultats établis (17). Cette affirmation renforce également les auteurs qui pensent que tout travail scientifique en biologie doit commencer par un travail naturaliste consistant à *nommer, décrire, classer et dresser un tableau* des observations de manière empirique. Claude Bernard est plus nuancé. S'il reconnaît un rôle d'obstacle aux idées fixes auxquelles le savant tient au point de ne pas y renoncer même en présence d'une contradiction, il soutient au contraire fortement le rôle directeur des idées, c'est-à-dire le rôle moteur dans le travail de recherche. Une idée anticipe sur l'expérience, et elle permet d'aller au-delà des faits. Il ne fait aucun éloge de l'ignorance, mais le petit jeu des citations tronquées et sorties de leur contexte permet de le faire apparaître beaucoup plus positiviste ou plus spiritualiste qu'il ne l'est. Donnons quelques exemples de formulations équilibrées extraites du livre cité précédemment :

faut-il renoncer
à une théorie
devant un fait ?

les idées ont
un rôle moteur
dans la
recherche

(16) BERNARD, C. (1865). *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*.

(17) PROCHIANTZ, A. (1990). *Claude Bernard. La révolution physiologique*. Paris : PUF.

“ Toute l’initiative expérimentale est dans l’idée, car c’est elle qui provoque l’expérience. La raison ou le raisonnement ne servent qu’à déduire des conséquences de cette idée et à les soumettre à l’expérience...”

Une idée anticipée ou une hypothèse est donc le point de départ nécessaire de tout raisonnement expérimental. Sans cela on ne saurait faire aucune investigation ni s’instruire ; on ne pourrait qu’entasser des observations stériles. Si l’on expérimentait sans idée préconçue, on trait à l’aventure ; mais d’un autre côté, ainsi que nous l’avons dit ailleurs, si l’on observait avec des idées préconçues, on ferait de mauvaises observations et l’on serait exposé à prendre les conceptions de son esprit pour la réalité...

Ce qu’il faut seulement noter pour le moment, c’est que l’idée expérimentale n’est point arbitraire ni purement imaginaire ; elle doit avoir toujours un point d’appui dans la réalité observée, c’est-à-dire dans la nature. L’hypothèse expérimentale en un mot doit toujours être fondée sur une observation antérieure. Une autre condition essentielle de l’hypothèse, c’est qu’elle soit vérifiable expérimentalement. En effet, si l’on faisait une hypothèse que l’expérience ne pût pas vérifier, on sortirait par cela même de la méthode expérimentale pour tomber dans les défauts des scolastiques et des systématiques...

Si les faits donnaient nécessairement naissance aux idées, chaque fait nouveau devrait engendrer une idée nouvelle. Cela a lieu, il est vrai, le plus souvent, car il est des faits nouveaux qui, par leur nature, font venir la même idée nouvelle à tous les hommes placés dans les mêmes conditions d’instruction antérieure. Mais il est aussi des faits qui ne disent rien à l’esprit du plus grand nombre, tandis qu’ils sont lumineux pour d’autres. Il arrive même qu’un fait ou une observation reste très longtemps devant les yeux d’un savant sans lui rien inspirer...

On donne généralement le nom de découverte à la connaissance d’un fait nouveau ; mais je pense que c’est l’idée qui se rattache au fait découvert qui constitue en réalité la découverte.”

Le statut des mathématiques dans le travail scientifique constitue une autre pierre d’achoppement pour situer la place des faits par rapport à la théorie. Selon la pensée commune les mathématiques ne servent qu’à décrire les résultats, à leur donner une forme, et non pas à expliquer le réel et encore moins à le constituer, à produire des observations, à en constituer la condition de possibilité indispensable. Cette épistémologie de la “traduction” est largement partagée et nie tout rôle créateur aux mathématiques (Lange, 2000). Et pourtant selon Georges Canguilhem, c’est bien “dans l’effort pour probabiliser le jugement médical qu’il faut voir un des vrais commencements de la scientificité de la médecine” et ceci dès le début du XIX^e siècle, bien avant Magendie et Claude Bernard. “La logique du probable que la

il existe des faits
qui ne disent
rien à l’esprit

une science
du risque est
une science
de la vie

médecine doit prendre en compte est une science de l'espérance et du risque. Sous ce rapport elle est authentiquement une science de la vie." (18). Insistons immédiatement et nous y reviendrons par la suite. La vie c'est le jeu des possibles, autrement dit une combinatoire au niveau des mutations des nucléotides, c'est aussi une éthique du risque assumé, du dépassement, de l'adaptation à des situations nouvelles et non pas du repli défensif. Il est vrai que si nous n'enseignons pas explicitement la médecine dans l'enseignement secondaire, elle sert bien souvent de faire valoir de la biologie directement ou dans ses recommandations pratiques, préventives ou prédictives.

2.2. Les faits bruts n'existent pas

un fait doit être vérifié théoriquement

Bachelard (19) citant A. Koyré rappelait que "les propositions théoriques cherchaient naturellement leur vérification expérimentale". Mais il indiquait également que ce même auteur soulignait l'existence d'un mouvement inverse. Il faut "qu'un fait, pour être vraiment un fait scientifique, soit vérifié théoriquement". Entendons, il faut qu'un fait trouve sa place dans une théorie rationnelle.

• Conceptualiser pour observer

On ne peut "observer" un message nerveux circulant dans un nerf sans l'aide du concept de codage. L'observation empirique montre une suite de potentiels de fréquence plus ou moins régulière. On peut en calculer la fréquence moyenne ou bien distinguer plusieurs parties et en particulier la petite "bouffée" initiale. Seule l'idée que ces changements de fréquence puissent traduire diverses informations provenant d'un récepteur (d'un fuseau neuro-musculaire par exemple) sous une forme codée en fréquence peut laisser supposer que ces potentiels forment un message (ou plusieurs). Il reste alors à se demander ce qui est ici codé : valeur absolue de la longueur du muscle, variation relative de la longueur, vitesse de variation de la longueur lors d'un mouvement, ou plusieurs paramètres à la suite.

le concept de mutation désigne une réalité potentielle

Le concept de mutation n'est pas la simple description des divers accidents qui peuvent intervenir au niveau de la séquence des nucléotides dans la molécule d'ADN : délétion, substitution, addition, inversion, répétition, etc. C'est aussi le concept d'une réalité potentielle (mais non virtuelle), qu'il est possible de réaliser au laboratoire grâce à divers rayonnements par exemple. Le laboratoire fait apparaître ces causalités dormantes et qui ne sont éventuellement pas viables

(18) CANGUILHEM, G. (1994). Le statut épistémologique de la médecine. In *Études d'histoire et d'épistémologie des sciences concernant les vivants et la vie*. Paris : Vrin, 7^e éd. augmentée.

(19) BACHELARD, G. (1972). *L'engagement rationaliste*. Paris : PUF, p. 41.

dans la nature. Le concept de mutation est celui d'une combinatoire susceptible de se réaliser au niveau des codons. C'est également le concept d'un outil d'analyse des fonctions de tel ou tel mécanisme grâce à sa suppression ou à sa modification. C'est ce jeu des possibilités qui conduit à rechercher des cas observables comme dans le cas du polymorphisme des hémoglobines par exemple (20).

l'hérédité,
est-ce un moule
ou un plan?

Conceptualiser l'hérédité ce n'est pas simplement constater des ressemblances d'une génération à l'autre et connaître un mécanisme de transmission. Il faut également se demander ce qu'il y a à transmettre. Pour construire un organisme faut-il transmettre un "moule" qui va permettre de fabriquer le nouvel organisme par moulage, ou bien faut-il transmettre un "plan" de construction pour organiser des matériaux synthétisés par ailleurs ? La thèse de Marcelle Goix (1996) tente de répondre à cette question.

On pourrait multiplier les exemples en citant les travaux de didactiques qui abordent tel ou tel aspect.

Établir une *carte géologique* peut donner le sentiment qu'il suffit de se déplacer à pied sur le terrain, d'établir des relevés, de prélever des échantillons et de reporter le tout sur un fond topographique. La thèse de Pierre Savaton (1998) montre que c'est beaucoup plus complexe et que la part d'interprétation est fondamentale.

L'utilisation d'une technique d'observation telle le *microscope* semble simplement prolonger le regard et en augmenter les capacités. La thèse de Najoua Ben Ouadday (1999) montre bien que cet instrument est en fait le prolongement de la pensée et non pas de l'œil. De même les *images médicales du "cerveau"* qui envahissent les manuels scolaires (et sous forme colorisée les revues de vulgarisation) offrent le sentiment de donner à lire le fonctionnement du cortex cérébral sinon même de "visualiser la pensée". Mais elles induisent sans le dire une vision localisatrice et mécaniste du fonctionnement (Mafféo, 1999).

il faut
conceptualiser
pour observer

Les *fossiles* stimulent l'attention du collectionneur et de l'amateur de singularités ou d'objets esthétiques. L'analyse naturaliste consistant à nommer, décrire, classer semble ici privilégiée. Et pourtant le simple problème de leur fossilisation et donc de la non conservation éventuelle guide la recherche d'une *absence* ou de *traces*. Sans parler des concepts nécessaires aux reconstitutions paléocéologiques, aux datations ou aux théories de l'évolution. Ici encore il faut conceptualiser pour observer (Delrue, 2000). Il en sera de même chaque fois que l'on veut "constater" une absence, un

(20) RUMELHARD, G. (1998). Le jeu des possibles et la réfutation. *Biologie-Géologie (APBG)*, 1, 113-119.

vide, une disparition telle *la subduction des plaques lithosphériques* (21).

La construction *d'arbres moléculaires* à partir de l'analyse des séquences d'acides aminés ou de protéines de diverses espèces animales ne relève pas de l'empirisme succédant à une simple lecture des séquences (Fortin, 1993). En un mot il faut toujours poser un *problème*, surmonter des *représentations*, *conceptualiser* ou *modéliser* pour produire des faits à observer (Orange, 1997).

Inversement certaines expériences tentant de reconstituer *l'apparition de la vie sur Terre* produisent des faits d'observation indubitables, mais qui n'ont peut-être aucune signification par rapport à l'histoire réelle qui s'est déroulée il y a quelques milliards d'années (Tirard, 1996).

• **Interpréter**

distinguer,
connaître et
comprendre

Si l'on adopte la distinction classique du philosophe allemand Dilthey entre *connaître* et *comprendre*, c'est-à-dire entre "expliquer" et "chercher le sens", on croit tenir à nouveau une distinction claire permettant de tracer une limite dans l'enseignement des sciences biologiques et géologiques. On peut décrire les mécanismes de la douleur et les médicaments permettant de la supprimer, mais on laisse de côté la question du sens de la douleur, de la maladie, sinon même du mal. La question du sens pourrait rester hors du champ de l'enseignement des sciences biologiques et géologiques. Notons cependant que le mot "comprendre" est le plus couramment utilisé et non pas le mot "connaître". Analysons quelques cas pour lesquels la distinction n'est pas immédiate.

Gravure et écriture : la vallée des merveilles (22)

répertorier
les gravures
ne suffit pas
à les interpréter

Dans les deux vallées du Mont Bego, la vallée des Merveilles au nord de Nice et celle de Fontanalba, on a relevé plus de 100 000 gravures martelées entre 1800 et 1500 ans avant Jésus-Christ. Depuis la fin du siècle dernier les préhistoriens s'y sont intéressés. Formés à l'école naturaliste, ils ont répertorié les gravures, les ont cartographiées, classées avec toute la patience et la rigueur nécessaire. Mais aucune interprétation réellement convaincante n'avait été proposée. En 1991 une épigraphiste se pencha sur cet ensemble. Elle avait appris à lire *cunéiformes et hiéroglyphes, emblèmes et symboles, mythes et allégories*. Composées *avant l'écriture* ces gravures apparurent aussi bien dans leur ensemble que dans leurs parties comme un texte analogue à ceux des très vieilles

(21) GOHAU, G. (1987). *Histoire de la géologie*. Paris : éd. La Découverte.

(22) MASSON, E. (1993). *Vallée des Merveilles, un berceau de la pensée religieuse européenne*. Dijon : Éditions Fatou (distribué par les PUF) ; ainsi que *Les dossiers d'Archéologia*, Avril-Mai 1993. *Archéologia*.

tribus indo-européennes. Partout dans le monde les images symboliques ont précédé l'écriture. Le cadre naturel du Mont Bego a guidé l'ordonnancement rigoureux des représentations comme dans beaucoup d'autres sites rupestres. Ceci a permis de remarquer une figure toujours passée inaperçue : le centre de l'organisation du site est constitué par une figure sculptée par la seule nature sur un éclat triangulaire détaché de la Cime des Lacs et pointant vers le ciel. Cette figure majestueuse est haute d'une bonne quarantaine de mètres. Une nouvelle fois, observation et interprétation sont difficilement séparables. Et de plus l'interdisciplinarité entre la préhistoire et l'origine de l'écriture est indispensable.

Les outils et le langage des hommes préhistoriques (23)

La paléontologie des hommes préhistoriques n'a aucun critère précis purement anatomique pour attribuer le caractère humain à un fossile. La recherche de la possibilité d'un langage devrait trouver des organes (larynx, cordes vocales) fossilisés ce qui est bien improbable. Le naturaliste prudent s'en tiendra là. Il dessine des lignées continues, ramifiées ou parallèles de pièces osseuses fossiles sans tracer de limite ou plutôt de "seuil" d'homínisation. Le philosophe dira que l'on ne peut envisager l'humanité sans langage, pas plus qu'on ne saurait concevoir l'homme sans technique. Le paléontologue André Leroi-Gourhan précise que s'il est possible, dans l'abstrait de concevoir une éducation technique purement gestuelle, dans le concret une éducation muette déclenche malgré tout, chez l'éducateur comme chez l'éduqué, la mise en marche d'un symbolisme réfléchi. L'apprentissage par pure imitation gestuelle est une hypothèse insoutenable. Le lien entre technique et langage paraît suffisamment fort pour que l'on puisse associer aux outils de pierre trouvés à côté de certains squelettes la maîtrise d'un langage de niveau correspondant à celui de leurs outils. La réalisation du moindre galet aménagé, et *a fortiori* d'un biface demande de nombreuses opérations qui préexistent à l'occasion d'en faire usage. Par ailleurs l'outil persiste en vue d'actions ultérieures. Il y a donc la possibilité d'un langage à partir du moment où la préhistoire livre des outils. Par contre ce qui caractérise chez les grands singes le "langage" et la "technique" c'est leur apparition spontanée sous l'effet d'un stimulus extérieur et leur abandon non moins spontané ou leur défaut d'apparition si la situation matérielle qui les déclenche cesse ou ne se manifeste pas. Les trente signaux vocaux différents des chimpanzés sont l'exact correspondant mental des bâtons emmanchés pour attirer la banane suspendue, c'est-à-dire aussi peu un langage que l'opération des bâtons n'est une technique au sens propre. Le naturaliste

outil et langage
ne se séparent pas

peut continuer de penser qu'il s'agit là d'une pure "interprétation" bien imprudente qu'aucun "fait" concret et visible ne vient appuyer. Mais il privilégiera une autre position qui n'est pas plus neutre, celle de la continuité entre le langage animal et le langage humain.

2.3. L'idéologie du "fait brut"

Au moment de la création d'un poste de médiateur au journal "Le Monde", le journaliste André Laurens appelé à remplir cette fonction a centré sa première intervention du 16 avril 1994 sur "les faits et leur interprétation". Citant les propos du fondateur Hubert Beuve-Méry dans le premier numéro daté du 19 décembre 1944, il rappelait que "Le Monde" se donnait pour ambition d'assurer au lecteur des informations claires, vraies et, dans toute la mesure du possible, rapides, complètes. En ajoutant immédiatement que "notre époque n'est pas de celles où l'on puisse se contenter d'observer et de décrire".

La presse américaine se croit infiniment plus objective que ses équivalents européens, auxquels elle reproche avec mépris de mélanger les faits et l'analyse. "Facts are facts", telle est la règle d'or d'un certain journalisme américain réputé pour sa persistance à déterrer les secrets qui déplaisent au pouvoir. Le fait doit être distingué à tout prix du commentaire. Mais qu'est-ce qu'un fait ? Un mensonge de McCarthy ou de toute autre personne est-il un fait tout simplement parce qu'il l'a dit ? Pour les Américains, celui qui écrit, preuves à l'appui, qu'il s'agit d'un mensonge n'expose pas un fait, il fait déjà un commentaire (24). On voit ici apparaître la représentation commune attachée à la notion de fait. Chacun le sait, "personne ne peut nier les faits", "quand les faits sont là il faut être de mauvaise foi pour les refuser", "les faits s'imposent d'eux-mêmes". Il suffit de constater un fait pour que la conviction se forme de la seule façon possible. C'est sur cette idéologie commune du fait que s'appuie le procureur Kenneth Starr lorsque, dans un procès célèbre à l'encontre du Président des États-Unis il s'exclame : "des faits, des faits, qu'on me donne des faits ; les faits parlent d'eux-mêmes". C'est dans cette même optique qu'une chaîne de télévision nommée *Euro News* peut diffuser simplement des images accompagnées du laconique "no comment" ! Les faits positifs sont de l'ordre du visible et parlent d'eux-mêmes. Pour un certain journalisme, au total *comprendre c'est voir* (25) (c'est-à-dire connaître selon la distinction précédente).

les faits bruts
n'existent pas

(24) TOINET, M.-F. (1984). Comment la presse a entretenu l'hystérie. In *Le Monde Diplomatique*, Février, p. 9.

(25) RAMONET, I. (1999). *La tyrannie de la communication*. Paris : Galilée, p. 88.

il ne suffit pas
de voir

La pédagogie emprunte sans le savoir cette idéologie particulièrement en biologie et en géologie. Connaître c'est voir. La pédagogie de l'évidence (au sens anglais très fort du mot *evidence*) privilégie l'observation, mais on ne sait plus toujours si le concept a provoqué l'observation, celle d'un réflexe par exemple, ou bien si le concept décalque tout simplement l'observation de la percussion d'un tendon par le marteau du médecin.

il ne suffit pas
de faire

De leur côté les méthodes actives privilégient "le faire" et les capacités, ou les compétences (est capable de). Dans cette optique *connaître c'est faire*. La survalorisation de l'expérimental, c'est-à-dire du fait produit, donné à observer et qui apporte l'évidence, trouve ici une raison supplémentaire.

Connaître c'est voir ; connaître c'est faire. Les deux affirmations sont en partie vraies, mais à condition qu'elles ne soient pas prises isolément et absolument. Connaître c'est aussi et surtout poser des problèmes, forger des concepts et porter des jugements de vérité. Donc le refuge protecteur derrière "le fait brut", observé empiriquement ou produit expérimentalement et qui permettrait d'éviter de prendre parti, sinon même d'éviter de réfléchir, met l'enseignement scientifique au service d'un anti-intellectualisme qui n'est pas tenable. Il le circonscrit dans l'infinie platitude d'un monde réduit à l'observable et qu'il suffirait de lire et de décrire, pas même de décrypter ni de découvrir, à supposer que quelqu'un l'ait "recouvert", mais qui et dans quel but ?

3. SCIENCE ET CULTURE

un autre
objectif de
l'enseignement:
le passage

Restaurer dans l'enseignement de la biologie la tension intellectuelle réelle, les passages entre la culture et les sciences et non maintenir une simple juxtaposition entre deux entités "hétérogènes", ou des échanges marginaux de contrebande comme le suggère la métaphore de la frontière, tel est l'objectif que l'on peut ajouter dès que l'on se préoccupe de représentations et d'obstacles à l'assimilation des résultats scientifiques. Prenons quelques exemples pour nous faire comprendre en laissant cependant de côté l'épistémologie et l'histoire des sciences ou plus exactement l'épistémologie historique maintes fois illustrée par ailleurs à propos de l'analyse des résistances à l'apprentissage.

3.1. Le psychique et le somatique

L'enseignement de la biologie est profondément tronqué et réduit à l'organique pour l'essentiel, en attendant l'envahissement par les molécules synaptiques et la psychopharmacologie. On trouve cependant de timides incursions pour relier les deux, telle le concept de *stress* analysé par Hans Selye dès 1946. Ses travaux sont popularisés dans les années

le concept de
stress réintroduit
la subjectivité

50 (26). Ce concept n'est cependant introduit dans l'enseignement secondaire que très tardivement en 1989 et presque immédiatement supprimé. Son intérêt réside en particulier dans l'étude de situations pathogènes spécifiquement humaines. La difficulté vient du fait qu'on ne peut établir une échelle objective des stimuli ou des agents pathogènes, et encore moins les mesurer. Ces agents ne sont pas reçus par l'organisme comme des faits physiques bruts, mais ils sont vécus par la conscience comme des "signes" de tâches ou d'épreuves. Placer en tête d'une échelle de stress le décès du conjoint prête aisément à discussion. Tout dépend donc de la *signification* que cela prend pour tel individu, à un moment donné, en un lieu donné. La médecine, ivre de mesures et de nombres, a tendance à éliminer le stress des facteurs de risque envisageables pour les maladies cardiaques par exemple. Voici donc un domaine de physiologie médicale dans lequel la *subjectivité* ne peut être éliminée. Est-ce pour cela qu'on l'élimine des programmes d'enseignement et même de l'analyse médicale de certaines maladies ?

le placebo
implique
la relation
médecin-
malade

Le concept de *placebo* a compliqué la démonstration de l'efficacité d'une thérapeutique prescrite. La nécessité de travailler en "double aveugle" correspond à la prise en compte des observations de la médecine psychosomatique, à l'intérêt accordé à la relation intersubjective médecin-malade, au rôle joué par la simple présence du médecin et l'écoute attentive de la souffrance (27). Cette question n'a jamais été inscrite au programme de l'enseignement secondaire fut-ce sous l'angle d'une simple prudence méthodologique.

3.2. Surmonter les obstacles et les surdéterminations

La thèse des *représentations* qui font obstacle à l'assimilation des connaissances a été très largement popularisée et illustrée de nombreux exemples en didactique de la biologie et de la géologie pour qu'il soit inutile d'y revenir longuement ici. Les travaux à citer seraient trop nombreux. Rappelons cependant qu'il ne s'agit pas seulement de la lutte "externe" contre les préjugés, les ténèbres obscurantistes, ce qui est, somme toute, assez facile (quand on a expliqué l'éclipse du soleil par la lune à l'aide des orbites et d'un calcul il est assez aisé de contester toutes les autres explications) mais contre soi-même, à "l'intérieur" de soi-même. Bachelard utilisait la notion "*d'engagement rationaliste*". Pour lui la rationalité n'est pas une "*position*" dans laquelle on pourrait "*s'installer*" et à partir de laquelle on pourrait dévaloriser tous les

(26) SELYE, H. (1950). *Stress*. Montréal.

(27) SCHWARTZ, D. et al. (1970). *L'essai thérapeutique chez l'homme*. Paris : Flammarion.

unerectification
permanente

préjugés. On connaît l'aveu : "*Rationaliste ? Nous essayons de le devenir.*" En ce sens le centre de gravité d'un enseignement scientifique réside dans le *passage* des représentations qui font obstacle aux concepts dans une sorte de rectification et de rupture permanente avec soi-même.

3.3. Santé et environnement

la physiologie
du mammifère
qui vit en nous

Peut-on inscrire les questions de santé et d'environnement dans l'enseignement non pas comme simples faire-valoir de la science, en évoquant les bienfaits et les risques du progrès et de ses "applications", mais pour les questions éthiques, psychanalytiques, juridiques et politiques qu'elles posent ? Dans le cas de la santé par exemple : définition du concept, autorisation d'expérimenter, enquêtes généalogiques, dépistage, prévention, prédiction, expérimentation sur l'embryon, etc. La définition "objective" du concept de santé derrière laquelle un enseignement scientifique pourrait se réfugier ne résiste pas aux analyses sérieuses. La santé qui d'une certaine façon est l'objet même de toute la physiologie cellulaire et de la physiologie de l'organisme entier vivant dans diverses conditions de milieu (travail, sport, loisirs) se situe à la croisée des notions populaires et *a priori* qui contiennent une part de vérité, d'une approche scientifique qui met temporairement entre parenthèses autant que faire se peut toute forme de *subjectivité*, de *signification* ou de *symbolique*, réduisant l'analyse à celle du Mammifère qui vit en nous, et des différentes idéologies socio-politiques au premier rang desquelles vient l'idée même de *guérison*. Une analyse parallèle serait à faire pour le concept d'environnement en relation avec l'approche écologique scientifique nécessairement réductrice.

éthique
de la peur ?
ou éthique
du risque ?

La *bioéthique* a été introduite dans les programmes d'enseignement, mais la question n'a jamais été posée à l'examen du baccalauréat. Dans les manuels elle n'est pas traitée à proprement parler. Seuls des extraits de textes de personnalités ou du Comité national d'éthique y figurent mais on ne trouve aucun exposé de *principes* qui pourraient guider les *jugements* des élèves. Un manuel rédigé avant les lois de juillet 1994 affirme même que ces questions relèvent de la conscience personnelle ce qui est parfaitement discutable puisque des médecins sont également concernés. Y aurait-il accord spontané entre le "droit subjectif" d'un individu et le "droit subjectif" d'un médecin dont le métier est par ailleurs défini par un "serment" d'Hippocrate (28) ? Par ailleurs la seule éthique possible serait-elle une éthique de la *peur* comme celle préconisée par Hans Jonas ? N'y aurait-il pas de place pour une éthique du *dépassement*, du *risque affirmé*

(28) AMBROSELLI, C. (1988). *L'éthique médicale*. Paris : PUF, coll. *Que sais-je ?*

et assumé par l'individu pour *franchir ses limites* et s'ouvrir de nouveaux horizons (29) ?

3.4. Combattre certaines idéologies

Certains manuels scolaires tentent de montrer que l'on peut critiquer le racisme au nom de la génétique. L'intention est généreuse, mais il n'est pas sûr qu'elle atteigne son but. Il ne suffit pas de montrer à l'aide d'un calcul que nous "*sommes tous différents, tout en étant tous parents*" pour lutter contre une idéologie politique aux racines profondes à l'intérieur de chacun (Abrougui, 1997). On a peut-être trop oublié, à cause des crimes de l'Allemagne nazie (30), que les manuels scolaires contenaient jusque dans les années 30 des incitations eugénistes (31) au nom de la même génétique. Plus brutalement Henri Atlan précise que "*les généticiens de tous les pays, américains, anglais, français, allemands, de droite comme de gauche, depuis les débuts de la génétique jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, ont été eugénistes. Pour eux, la génétique était un moyen d'améliorer la race humaine. Le programme de Platon se trouve repris par tous les généticiens, soit explicitement, soit implicitement.*" (32). Quant à "*l'éloge de la différence*" il n'est pas dénué d'ambiguïtés même s'il est bien intentionné. Après avoir insisté sur "l'unité" du vivant les programmes insistent désormais sur "l'unicité" de chaque individu. Ici encore le non-dit prévaut. Il est peu probable de rencontrer dans un manuel scolaire une discussion visant à montrer qu'une fétichisation de la différence aboutit à l'inverse de ce qu'elle vise. Inventée aux États-Unis il y a trente-cinq ans la politique de *discrimination positive (affirmative action)* consiste à mettre en œuvre légalement un traitement préférentiel en faveur de groupes humains victimes d'injustices. Elle repose sur l'idée que pour réparer une inégalité il convient de valoriser une différence contre une autre différence. Or une discrimination ne peut jamais être *positive* puisqu'elle suppose toujours l'existence d'une autre *victime* servant de bouc émissaire par sa différence même (33).

l'eugénisme
omniprésent

(29) LECOURT, D. (1990). *Contre la peur, de la science à l'éthique...* Paris : Hachette. 2^e éd. augmentée (1993). Paris : Hachette, coll. *Pluriel*.

(30) BÄUMER-SCHLEINKOFER, A. (1995). *Nazi Biology and Schools*. Bern : Peter Lang. Translated by Neil Beckhaus.

(31) DE HART HURD, P. (1978). The historical/philosophical background of education in human genetics. *The BSCS Journal*, 1, 1.

(32) ATLAN, H. (1999). La biologie de demain n'est pas l'eugénisme nazi. *Le Monde des Débats*, Novembre, p. 11.

(33) ROUDINESCO, E. (1999). L'universel, la différence, l'exclusion. In *Pourquoi la psychanalyse* (pp. 171-177). Paris : Fayard.

le risque
d'une science
comme religion

Il faudrait encore développer ici les arguments qui conduisent Jean-Jacques Salomon à conclure que *"le biologiste de demain sera tout à la fois chercheur, détective, expert, juge, augure et prêtre, confesseur, inquisiteur, prix Nobel et gardien de l'ordre social. La métaphore du Graal ne nous fait pas seulement entrer dans un monde où la science est réconciliée avec la religion. Dans les certitudes du post-modernisme, c'est en somme la science qui est la religion révélée."* (34)

3.5. L'individu

L'existence d'individus a souvent été présentée comme un obstacle à l'activité scientifique. Il n'y a de science que du général et du répétable. Et pourtant la question des rapports de l'individu au type d'une espèce, celle de la variabilité individuelle, celle des fondements biologiques de l'individualité (35) proposés par la génétique immunologique sont au cœur des questions que se posent les chercheurs en biologie. Elles ne sont pas sans résonances fortes en sciences humaines (36).

3.6. Organes des sens, organes du sens

l'œil n'est pas
seulement un
récepteur...

... c'est aussi
un détecteur

Il ne s'agit pas d'un mauvais jeu de mots s'appuyant sur la polysémie très large d'un terme. L'étude de la perception des couleurs, des sons, des odeurs et des saveurs, etc. n'est pas au programme du second cycle de l'enseignement secondaire. L'œil en tant qu'organe des sens l'a longtemps été avant d'être supprimé. Le terme de "récepteur" banal et classique en soi induit une vision passive de cet organe et oriente toute l'étude vers les caractéristiques des paramètres physiques "reçus". Qu'un didacticien de la physique prenne cette direction d'étude ne l'empêchera pas de buter sur le fait que les courbes de sensibilité de l'œil sont relatives à l'observateur (37) et posent un problème de signification tout autant que d'explication. Mais le terme de "détecteur" ou de "cap-teur" induit un rôle actif et sélectif. Il ne suffit pas que le rayonnement soit présent pour qu'il soit détecté. Tout dépend en fait de la "signification" qu'il prend pour l'animal ou l'homme dans une situation donnée. La subjectivité est ici réintroduite. Dans le même ordre d'idées, il faut certainement être un adepte forcené des procédés de restauration rapide (fast food) pour considérer que les questions d'alimentation peu-

(34) SALOMON, J.-J. (1999). *Survivre à la science. Une certaine idée du futur*. Paris : Albin Michel.

(35) MOULIN, A.-M. (1986). Les fondements biologiques de l'individualité. In Barreau, H. (éd.) *op. cit.*

(36) BARREAU, H. (éd.) (1986) *Le même et l'autre. Recherches sur l'individualité dans les sciences de la vie*. Paris : CNRS.

(37) CHAUVET, F. (1994). *Construction d'une compréhension de la couleur intégrant sciences, techniques et perception*. Thèse Université Denis Diderot, Paris 7.

vent se réduire à des questions quantitatives et qualitatives de glucides, lipides, protides, sels minéraux et vitamines.

3.7. Résonance affective des connaissances

La connaissance scientifique déçoit, incise, inquiète, angoisse même parfois au moins autant qu'elle soulève l'espoir d'un progrès, d'une amélioration des conditions de vie ou de santé. L'explication des maladies en termes de maladie microbienne, génétique, auto-immune, psychosomatique, etc. ne peut laisser indifférent quant à l'incidence affective et sociale. Nous l'avons déjà développé ailleurs : la maladie microbienne désigne un objet identifiable et extérieur à l'individu. Cette théorie est en quelque sorte déculpabilisante pour l'individu atteint et accusatrice de la société. La maladie expliquée par la génétique, avec ou sans incidence du milieu, est autrement difficile à admettre par son caractère culpabilisant pour la filiation familiale. Être malade à cause d'une "erreur" biochimique n'a pas la même résonance pour l'individu et pour la société qui peut également s'en préoccuper (détection prénatale ou préimplantatoire, prédiction avant la fécondation). Un enseignement ne peut ignorer cette dimension qui peut être totalement absente dans un congrès scientifique. Ou plus exactement en l'ignorant, comme il le fait actuellement, il prend le risque de blesser ses élèves.

la maladie
microbienne
est déculpabilisante

3.8. La fécondation *in vitro*

L'innocente et bienfaitante FIVETE semble répondre à une demande unanime des couples ayant des difficultés pour avoir un enfant. En fait elle a déssexualisé l'origine de la vie. Peut-on donc l'enseigner de manière neutre sinon anecdotique, ou même la célébrer comme un important progrès des recherches médicales et biologiques étroitement associées ? On peut au contraire penser que l'externalisation de l'œuf humain, la possibilité de procréer sans sexualité, qui descelle l'alliance des sexes dans la parentalité sont des événements d'une importance gigantesque pour l'humanité. Certains la célébreront comme une émancipation qui nous désaliène de toutes les différences, celles des sexes, celles des générations, différences qui sont à la source d'un formidable potentiel d'amour, mais aussi de graves conflits. Or la filiation parentale n'est pas une donnée d'évidence et doit être construite. Les repérages de la filiation permettent de construire les identités et la raison elle-même, c'est-à-dire d'échapper au délire (38). Sans avoir une culture psychanalytique approfondie et personnellement vécue, il est possible d'apercevoir derrière

la filiation
parentale doit
être construite

(38) VACQUIN, M. (1999). *Main basse sur les vivants*. Paris : Fayard.

transgresser
les interdits
fondateurs

cette technique le vœu infantile de toute puissance par excellence, le vœu d'auto-engendrement et la tentation, au nom de droits illimités, de nous libérer de tout devoir, de tout interdit donc de toute civilisation. Le mythe à l'œuvre dans cette technique de fécondation *in vitro* n'est pas tant celui de Prométhée, que celui d'Œdipe. Le sentiment de toute puissance qui est destructeur, implique qu'on limite son pouvoir d'action. La problématique n'est pas ici celle de la peur face à des innovations inquiétantes, peur qu'il faudrait exorciser grâce à l'alibi d'une thérapeutique bienfaisante source de progrès incontestables puisqu'elle diminue les souffrances, mais celle de *l'interdit fondateur de la culture et de la pensée* qu'il ne faut pas transgresser. En méconnaissant ces questions un enseignement de la biologie peut-il ignorer qu'il donne alors inconsciemment appui aux questions infantiles : "je ne suis pas né d'un rapport sexuel", "mes parents ne sont pas mes parents", "j'ai été conçu après la mort de mon père", "ma mère est vierge", et ceci d'autant plus que ces fantasmes deviennent réalité. On pourra encore soutenir que tout progrès scientifique se réalise en surmontant des obstacles, et bien souvent au prix d'une transgression. Mais il n'y a aucune raison d'en faire un critère *a priori* de scientificité. Il y a des transgressions salutaires et d'autres qui sont mortifères.

3.9. Une anthropologie de la résistance et des valeurs négatives

résistance aux
normalisations,
résistance à la
mécanisation

Nous n'avons pas épuisé le sujet avec ce rapide énoncé des questions qui donnent lieu à une tension, un va-et-vient, un passage entre l'analyse scientifique et les données des sciences humaines ou de la culture et ceci dans les deux sens. Terminons cependant avec la plus importante : la biologie, qui n'est pas réduite à une physico-chimie, soutient une anthropologie de la résistance (39). Résistance aux normalisations des écarts (Arrighi, 2000), des déviations, des déviances sociales, des anomalies, des mutations, des monstres, des erreurs ; résistance à la mécanisation du travail (40), à la technicisation de la médecine et, pour ce qui concerne la didactique, à la technicisation de l'apprentissage (41), c'est-à-dire à toutes les réductions qui oublient la vie non pas comme concept métaphysique, ou comme philosophie vitaliste, mais comme indicateur critique qui relance sans cesse les problèmes temporairement mis entre parenthèses et oubliés par une rationalisation scientifique à courte vue. "Il

(39) SALOMON, J.-J. (1985). Georges Canguilhem ou la modernité. *Revue de métaphysique et de morale*, 1, 52-62.

(40) FRIEDMANN, G. (1946). *Problèmes humains du machinisme industriel*. Paris : Gallimard.

(41) ASTOLFI, J.-P. (1997). *L'erreur, un outil pour enseigner*. Paris : ESF.

y a dans la connaissance de la vie des phénomènes qui la tiennent à distance de toute connaissance qui peut se référer aux domaines physico-chimiques ; c'est qu'elle n'a pu trouver le principe de son développement que dans l'interrogation sur les phénomènes pathologiques. Il a été impossible de constituer une science du vivant sans que soit prise en compte, comme essentielle à son objet, la possibilité de la maladie, de la mort, de la monstruosité, de l'anomalie, et de l'erreur." (42). C'est en ce sens seulement que son enseignement a une réelle valeur culturelle (43).

Guy RUMELHARD
Lycée Condorcet, Paris
Unité "Didactique des sciences
expérimentales", INRP

BIBLIOGRAPHIE

ABROUGUI, M. (1997). *La génétique humaine dans l'enseignement secondaire en France et en Tunisie. Approche didactique*. Thèse, Université Lyon 1.

ARRIGHI, M. Mémoire de thèse en cours.

BEN OUADDAY, N. (1999). *Approche par le microscope des objets biologiques et des problèmes spécifiques liés*. Thèse, Université Paris Sud.

DELRUE, M. Mémoire de thèse en cours.

FORTIN, C. (1993). *L'évolution, du mot au concept. Étude épistémologique sur la construction des concepts évolutionnistes et les difficultés d'une transposition didactique*. Thèse, Université Denis Diderot, Paris 7.

GIORDAN, A., DE VECCHI, G. (1989). *L'enseignement scientifique. Comment faire pour que ça marche ?* Nice : Z'éditions.

GOIX, M. (1996). *Les concepts de croissance et de développement : obstacles et représentations chez les élèves de collège ; propositions de situations didactiques pouvant faciliter l'apprentissage*. Thèse, Université Denis Diderot, Paris 7.

LANGE, J.-M. (2000). Mémoire de thèse en cours.

MAFFÉO, V. (1999) *Statut et rôle des images médicales du cerveau humain dans l'enseignement secondaire*. Thèse, Université Lyon1, Claude Bernard.

(42) FOUCAULT, M. (1985). La vie : l'expérience et la science. *Revue de métaphysique et de morale*, 1, 3-14.

(43) RUMELHARD, G. (1992). L'enseignement de la biologie comme culture. *Aster*, 15, 145-167.

ORANGE, C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF, coll. *l'éducateur*.

RUMELHARD, G. (1994). *La régulation en biologie. Approche didactique. Représentation, conceptualisation, modélisation*. Paris : INRP.

SAVATON, P. (1998). *L'enseignement de la carte géologique dans le secondaire. Bilan historique et didactique, réflexions et propositions d'apprentissages nouveaux*. Thèse, Université Denis Diderot, Paris 7.

TIRARD, S. (1996). *Les travaux sur l'origine de la vie de la fin du XIX^e siècle jusqu'aux années 1970*. Thèse, Université Denis Diderot, Paris 7.

LA PLURIDISCIPLINARITÉ DANS LES PROGRAMMES ET DANS LES ACTES : UNE TENTATIVE DANS L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

Dominique Galiana

L'objet de cet article est de présenter brièvement les réformes entreprises par le Ministère de l'Agriculture pour promouvoir la pluridisciplinarité dans les formations scolaires initiales. Les exemples cités concernent les disciplines de biologie-écologie, physique-chimie, éducation sportive mais aussi zootechnie et phytotechnie. Une approche historique rapide permet de retracer les débuts des réformes entreprises en ce sens (BTA 1984-1985) et le devenir de celles-ci (réforme de certains BTA en bacs technologiques puis des autres en bacs professionnels). Cependant, nous constatons qu'élaborer des réformes ne suffit pas toujours pour obtenir les résultats escomptés et nous précisons les difficultés que rencontrent les enseignants et les élèves lors de la mise en œuvre de ces réformes.

l'enseignement
scientifique
"découpé"
dans l'Éducation
nationale

L'un des principaux reproches que l'on adresse à l'enseignement scientifique actuel, c'est qu'il découpe les connaissances en tranches de saucisson. Ainsi, on étudie au lycée la physique, la chimie, les sciences de la vie au sein de classes disciplinaires avec une répartition horaire propre. Il existe en conséquence des programmes de physique, de chimie, de sciences de la vie... Certaines instructions officielles recommandent des travaux pluridisciplinaires. Mais cela reste marginal.

Dans ces conditions et malgré la bonne volonté et le savoir-faire des enseignants, il est à la charge de l'élève de faire des liens entre disciplines, entre concepts ou encore d'effectuer des transferts de connaissances. Rares sont les collègues qui ne déplorent pas qu'en cours de sciences de la vie, les élèves ne sachent pas utiliser une proportionnalité ou définir une famille de composés chimiques.

Si le constat paraît clair, il ne suffit pas de dénoncer cette situation. Il faut tenter d'y remédier. Assez loin des débats d'idées qui agitent le monde de l'Éducation nationale, les établissements relevant du Ministère de l'Agriculture sont confrontés à une approche radicalement différente en matière d'enseignement. Nous allons donc présenter une expérience originale : l'approche pluridisciplinaire retenue dans l'enseignement agricole depuis près de 15 ans.

une approche
différente dans
les établissements
relevant
du Ministère
de l'Agriculture

1. PREMIERS PAS : LA RÉNOVATION DES BREVETS DE TECHNICIEN AGRICOLE (BTA)

à partir de
la réforme
mise en place
en 1984-1985

C'est dans les années 1984-1985 que se met en place une réforme d'envergure dans l'enseignement agricole avec la rénovation des Brevets de Techniciens Agricoles (BTA). À partir de cette date, la conception des programmes et des enseignements se modifie radicalement ainsi que l'évaluation notée et la structure des examens.

1.1. Sur le plan de l'organisation des contenus

programmes
disciplinaires
imbriqués

Dans le cadre des BTA, les disciplines sont regroupées en modules et les programmes disciplinaires se retrouvent imbriqués. On distingue des modules généraux (B1, B2...), des modules de secteur (SP, SC ou SA suivant les spécialités) et des modules de qualification professionnelle (QP, QC...).

Sur un plan pratique, les programmes regroupent toutes les disciplines qui interviennent dans un même module. Voici par exemple un extrait du programme du module de secteur SC1 :

| | | |
|---|--|---|
| MODULE SC1 | Connaissance de la matière et du vivant | HORAIRE TOTAL : 90h + séquences en exploitation, entreprise et milieu. |
| OBJECTIF GÉNÉRAL | | DISCIPLINES ET HORAIRES |
| Acquérir des connaissances sur les constituants essentiels de la matière vivante, les principaux phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui régissent ses transformations et ses échanges avec le milieu extérieur. | | Sciences biologiques 45h Sciences physiques 45h |
| OBJECTIFS À ATTEINDRE | | CONTENUS |
| 1. Apprécier la diversité de la matière vivante et des fonctions qu'elle remplit, comparativement à son unité chimique. 1.1. Identifier et représenter les principales fonctions de la chimie organique. 1.1.1. Raisonner l'écriture des formules de composés organiques. 1.1.2. Identifier expérimentalement. 1.2. Expliquer schématiquement et illustrer expérimentalement les filiations des composés oxygénés. | | Principes généraux de la chimie organique : . tétravalence du carbone . liaison covalente . chaînes carbonées, groupements fonctionnels, isomérisation de position . nomenclature Structure et filiation suivante Alcools primaires-aldéhydes-acides Alcools secondaires-cétones |

| | |
|---|--|
| <p>1.3. Connaître les principales macromolécules caractéristiques du vivant.</p> <p>1.3.1. Écrire les structures respectives de divers lipides, glucides (linéaires), protides (structure primaire) et acides nucléiques.</p> <p>1.3.2. Énoncer les principales propriétés chimiques des lipides, glucides et protides.</p> <p>1.3.3. Réaliser les réactions classiques de caractérisation et de classification des lipides, glucides et protides.</p> <p>1.3.4. Montrer sur des exemples que la construction et la dégradation de la matière vivante s'appuient sur un nombre limité de réactions chimiques fondamentales.</p> <p>1.4. Appréhender la diversité des unités vivantes élémentaires.</p> <p>1.4.1. Savoir observer les cellules.</p> <p>1.4.2. Reconnaître et décrire les différents éléments de ces unités.</p> <p>1.4.3. Préciser le rôle des différents organites en mettant en évidence leur interdépendance.</p> | <p>Glucides</p> <p>Oses en C5 et C6, propriétés réductrices</p> <p>Osides (di et polyholosides) : structures et classification</p> <p>Lipides</p> <p>Acides gras (volatils, non volatils, saturés, non saturés)</p> <p>Lipides simples : structures et classification</p> <p>Protides</p> <p>Acides aminés (propriétés amphotères, condensation, liaison peptidique)</p> <p>Protides simples : structure et classification</p> <p>Acides nucléiques (structure schématique, nucléotides)</p> <p>Schéma des réactions suivantes : estérification, hydrolyse, condensation</p> <p>Structure et ultrastructure</p> <p>Cellule animale et cellule végétale</p> <p>Cellule bactérienne</p> <p>Virions</p> |
|---|--|

En lisant ce programme, on se rend compte que la répartition des cours entre physique-chimie et biologie n'est pas absolument fixée. Il y a une marge de manœuvre pour les enseignants à l'intérieur des contenus cités ci-dessus.

1.2. Sur le plan de l'évaluation

L'introduction du contrôle en cours de formation (CCF) est une autre nouveauté de taille de la réforme du BTA. Il s'agit non moins que de permettre à l'équipe enseignante d'un établissement de procéder à des évaluations certificatives pluridisciplinaires qui comptent pour une part non négligeable (50 %) dans l'obtention de l'examen final. La réussite à l'examen se trouve ainsi non seulement conditionnée par les épreuves terminales (qui ressemblent à toutes les autres épreuves d'examen si ce n'est qu'elles sont pluridisciplinaires), mais aussi par les notes certificatives obtenues tout au long des deux années de scolarité.

Dans un premier temps, le nombre d'épreuves certificatives était laissé au libre choix des équipes pédagogiques. Mais en 1995, dans une note de service destinée à tous les établisse-

contrôle
en cours
de formation
comptant
à 50 % dans
l'obtention
du BTA

ments, il est écrit : “La présente note de service précise les dispositions en vigueur en matière d'évaluation en cours de formation.

Rappel des principes à observer : limiter le nombres de contrôles; diversifier les situations d'évaluations; répartir les contrôles dans le temps; respecter la cohérence modulaire.” (1)

Aujourd'hui, un certain nombre de BTA ont été réformés en bacs Pro.

2. LES PRINCIPES DE L'ENSEIGNEMENT DANS LES FILIÈRES STAE DE L'ENSEIGNEMENT AGRICOLE

Les classes de BTA étant destinées à disparaître à plus ou moins brève échéance au profit des bacs Pro., nous nous proposons de présenter plus précisément maintenant les programmes et les instructions officielles concernant le cours de biologie dans la filière technologique STAE (Sciences et Techniques de l'Agronomie et de l'Environnement). Cette filière mise en place en 1992 reprend et développe les principaux éléments de la réforme de 1984.

2.1. Sur le plan de l'organisation des contenus

dix matières

La formation est articulée autour de dix matières. Mais il faut entendre matière dans un sens particulier. Les matières désignent une entité qui regroupe le plus souvent plusieurs disciplines. Quelques exemples permettront de mieux comprendre ce dont il est question ici.

une matière regroupe plusieurs disciplines...

Si nous considérons la discipline biologie, celle-ci est partie constituante de quatre matières :

- la matière M3 qui regroupe sport et biologie ;
- la matière M7 qui regroupe physique, chimie et biologie ;
- la matière M9 qui regroupe agronomie, agroéquipement et biologie ;
- et enfin la matière M10 (qui diffère suivant les spécialités) et constitue ce qu'il convient d'appeler la technologie de l'option choisie.

... et plusieurs enseignants

Ici comme pour le BTA, plusieurs enseignants doivent intervenir de manière coordonnée au sein d'une matière. La pluridisciplinarité est donc au centre de cette architecture ainsi que cela est souligné dans le référentiel de la formation : “Des matières pluridisciplinaires qui s'appuient sur des travaux pratiques et des situations concrètes : chaque matière, pluridisciplinaire, est définie en fonction d'un objectif général de la

(1) Note de service DGER/POFEGT/N95/n° 2103 du 12 octobre 1995.

formation. Au sein de chaque matière, l'horaire affecté à chaque discipline permet une répartition entre les travaux en classe, les travaux pratiques ou travaux dirigés, les modules, les activités pluridisciplinaires." (2)

2.2. Sur le plan de l'évaluation

contrôle
continu
comptant
pour 40 % de
la note finale
de l'examen

Les élèves sont ici aussi soumis à un contrôle certificatif. Il s'agit d'un contrôle continu dont les notes comptent pour 40 % dans la note finale de l'examen.

Ces épreuves se déroulent dans l'établissement et sont organisées par les enseignants habituels des élèves. Au cours des deux années, les élèves devront passer 18 épreuves certificatives. Ces notes s'ajouteront à celles obtenues lors des épreuves terminales qui se déroulent en fin de classe de Première et en fin de Terminale. Un jury décide de l'admission de l'élève ou de son ajournement car il n'existe pas, dans ce système, d'épreuves de rattrapage.

3. POUR CHAQUE MATIÈRE DU STAE, UN PROGRAMME PLURIDISCIPLINAIRE

3.1. Le programme de la matière M3

Le programme de la matière M3 est l'un des meilleurs exemples pour bien percevoir ce que peut être l'esprit du STAE et la continuité avec le BTA malgré les différences de vocabulaire.

Cette matière concerne donc la biologie (32 h sur les deux années) et les activités sportives (192 h sur les deux années). Il peut paraître dérisoire de choisir un tel exemple pour justifier de la pluridisciplinarité compte tenu du déséquilibre horaire entre les deux disciplines. En lisant les instructions officielles, on peut en faire une analyse différente. À propos de cette matière on peut ainsi lire : "*Sa dimension pluridisciplinaire s'inscrit dans une logique de construction des savoirs dont la biologie est un des acteurs essentiels.*" (3)

biologie et sport

Puis plus loin : "*L'étalement de la matière sur deux ans est indispensable afin de permettre aux enseignants d'articuler ces contenus avec ceux de la matière M7 et d'organiser, dans le temps, l'évaluation certificative en cours de formation.*" (4)

(2) Ministère de l'Agriculture et de la Pêche ; Direction générale de l'enseignement et de la recherche. *Baccalauréat technologique série Sciences et technologies de l'agronomie et de l'environnement*. Édition du 13 septembre 1993. CNPR ; Lempdes ; p. 10.

(3) *Ibid.* ; p. 15.

(4) *Ibid.* ; p. 15.

Deux éléments apparaissent ici réaffirmés : la nécessaire pluridisciplinarité au sein de la matière mais aussi les liens avec les autres matières (ici M7).

Si nous entrons dans le détail du programme de la matière M3, nous voyons que celle-ci est organisée en objectifs. Deux objectifs constituent le cadre du programme de cette matière :

- *“évaluer ses capacités physiques en utilisant des connaissances sur l’anatomie, la physiologie et les activités physiques ;*
- *maîtriser la pratique d’activités physiques et sportives d’expression de nature différente” (5).*

anatomie,
physiologie
et activités
physiques

Seul le premier objectif concerne l’enseignement de la biologie. En classe de Première, le professeur de biologie doit faire acquérir des notions de nutrition humaine (besoins nutritionnels de l’homme, relation entre nutrition et santé, bases de l’alimentation humaine) et présenter une approche systémique des activités physiques et sportives (identification des systèmes et appareils impliqués dans la posture et le mouvement, analyse des corrélations et adaptations fonctionnelles intervenant dans les activités physiques et sportives).

À propos de l’approche systémique des activités physiques et sportives, le programme précise dans la colonne *“compétences/commentaires”* :

“Montrer les relations entre activité physique et circulation, respiration, composition du sang (rappels anatomiques limités) ; insister sur l’adaptation à l’effort, sur les besoins en oxygène et en métabolites énergétiques, sur la capacité maximale d’oxygénation. Utiliser les informations liées à l’effort et pouvant être repérées dans l’action : par exemple : mesure des paramètres physiologiques : pouls, tension, rythme cardio-respiratoire. Interpréter ces paramètres.” (6)

l’adaptation
à l’effort

Les contenus de la discipline biologie ont ici un statut utilitaire et doivent permettre une approche raisonnée de la pratique sportive. Il s’agit en quelque sorte d’une discipline *“outil”*.

Cet extrait permet de voir que, dès la conception de cette matière, il a été pris en compte de réelles activités pluridisciplinaires. Ce qui nécessite, bien entendu, une bonne coordination entre les enseignants concernés et un échange constant d’informations.

biologie outil
pour la pratique
sportive

(5) *Ibid.*; p. 16 et p. 18.

(6) *Ibid.*; p. 15.

3.2. Un autre exemple, la matière M7

physique-
chimie et
biologie

La matière M7 concerne le professeur de physique-chimie (192 h sur les deux années de Première et Terminale) et celui de biologie (128 h sur les deux années).

En classe de Première, par exemple, l'objectif 1 s'intitule : *"Mettre en évidence l'unité de la matière vivante et réaliser une approche concrète des biomolécules."* Dans ce cadre, les notions de physique-chimie à faire construire sont celles de la chimie organique (structure des molécules carbonées, principales fonctions de la chimie organique comme les alcools, les cétones, les aldéhydes, les acides carboxyliques...). Il est précisé à ce propos dans la colonne commentaires : *"Présenter, en fin d'étude, des molécules d'intérêt biologique : acides carboxyliques du cycle de Krebs, acides aminés parmi les plus simples, acide lactique, glycérol..., sans en exiger la mémorisation."* (7)

chimie
organique outil
pour la biologie

Ici, c'est la chimie qui est la discipline "outil" au profit de la biologie. Il s'agit d'éclairer le contenu suivant qui relève de la biologie : composition chimique de la matière vivante. Dans les commentaires du programme il est indiqué : *"Cette partie relève du programme de biologie mais peut être traitée en pluridisciplinarité."* (8)

4. UNE APPROCHE CONCRÈTE ET PRATIQUE

importance
des TP...

À plusieurs reprises, les concepteurs de programmes insistent sur la nécessité d'une approche pratique et concrète en physique-chimie comme en biologie. Pour ce qui concerne la pratique, la liste des travaux pratiques (TP) possibles est indiquée dans la colonne commentaires des programmes. On y trouve l'horaire indicatif à consacrer aux différents TP. Il s'agit ici de faire en sorte que les enseignements ne dérivent pas vers une pratique uniquement papier-crayon comme cela se voit parfois dans certaines classes. Cela ne règle pourtant pas les problèmes liés à l'introduction de l'expérimental dans le cours de biologie (9).

Ainsi, toujours en classe de Première, l'approche de la notion d'écosystème doit être réalisée grâce à l'étude pratique d'un milieu qui *"doit permettre l'acquisition des connaissances énoncées"* (10). Pour cela, il faut *"réaliser des relevés dans le*

(7) *Ibid.* ; p. 60.

(8) *Ibid.* ; p. 60.

(9) GALIANA, D. (1999). *Problèmes didactiques posés par l'enseignement expérimental de la biologie dans les classes des lycées. Cas de la photosynthèse*. Mémoire de thèse, Université Paris Sud, Orsay.

(10) *Ibid.* ; p. 65.

temps et dans l'espace permettant de caractériser les facteurs abiotiques et les facteurs biotiques". Il faut aussi "introduire la terminologie au fur et à mesure de la progression de l'étude du milieu". Selon les concepteurs de programme, c'est ainsi que l'on peut permettre "une approche concrète de la notion d'écosystème" (objectif 6).

...y compris
dans les
deux CCF

Quant à l'évaluation certificative pour la matière M7, elle comprend deux CCF pratiques : l'un de biologie et l'autre de physique-chimie. Voilà de quoi faire en sorte que les élèves effectuent un minimum de travaux pratiques !

5. DE L'INTENTION À LA RÉALITÉ DANS LES CLASSES

Il ne suffit pas, bien entendu, de faire des programmes pluridisciplinaires pour que les enseignements le soient ou le deviennent comme par enchantement. Notre position d'enseignant et de formateur d'enseignants nous a permis d'apprécier combien la mise en œuvre de la pluridisciplinarité est difficile à réaliser.

5.1. Premier obstacle

vaincre
les vieilles
habitudes
disciplinaires
est difficile

Il faut vaincre de vieilles habitudes disciplinaires des enseignants. Plus de quinze ans après l'introduction de la pluridisciplinarité dans les programmes, les réflexes restent disciplinaires. Il n'est pas toujours évident de faire des relations en biologie avec le cours de mathématiques ou avec celui de physique-chimie dont on ne domine pas forcément les concepts. Et puis, pour y parvenir, il faut avoir eu le temps et/ou la curiosité de regarder dans le détail ce qui se fait dans les autres disciplines de la même matière.

Les élèves comme les enseignants sont habitués à raisonner en terme de discipline. Ils doivent donc, eux aussi, faire face à un changement conceptuel difficile.

5.2. Second obstacle

aller vers
l'autre collègue
nécessite
du temps

Il faut penser en termes de complémentarité, de concepts transversaux, d'application des connaissances à des domaines généraux ou plus techniques que l'on ne connaît pas forcément bien. Pour pouvoir parler de la nutrition humaine et faire le lien avec la nutrition animale, il faut faire l'effort d'aller vers le collègue zootechnicien pour voir ce qu'il est possible de faire ensemble. Il faut non seulement en avoir l'envie, mais aussi le temps.

5.3. Troisième obstacle

Il faut faire preuve d'imagination pour inventer de nouvelles manières d'approcher les notions enseignées. Ainsi, certains

imaginer
des nouveaux
dispositifs

collègues bloquent-ils une semaine pluridisciplinaire d'étude sur l'eau. On y aborde les aspects physico-chimiques, les aspects biologiques (indices biotiques), mais aussi les aspects sanitaires avec l'étude des paramètres qui permettent de définir la potabilité d'une eau pour l'alimentation humaine ou animale. Interviennent alors le professeur de biologie, celui de physique-chimie, celui de zootechnie et pourquoi pas celui de phytotechnie. Mais cela nécessite une bonne préparation, la suppression des cours des autres disciplines, et du matériel de TP. Enfin, il faut un effectif de classe qui ne soit pas trop important.

5.4. Quatrième obstacle

les emplois du
temps posent
problème

Même si l'on a de l'imagination, certaines solutions sont difficiles à mettre en place. Si l'on désire par exemple mettre deux enseignants de deux disciplines différentes dans la même classe en même temps, l'un des deux sera présent bénévolement. Dans le bac STAE, il n'est pas toujours prévu dans les horaires des enseignants, des plages qui permettent de telles actions (hors des semaines ou des journées bloquées).

5.5. Cinquième obstacle

la
pluridisciplinarité
absente
des examens

Si les épreuves certificatives peuvent réellement être pluridisciplinaires, il n'en est pas de même dans le cadre des épreuves d'examen. Il est en effet plus difficile de corriger de telles épreuves si celles-ci sont réellement pluridisciplinaires. L'imbrication des questions et des concepts ne permet pas une aussi grande lisibilité que lorsque l'approche est disciplinaire. Dans ce dernier cas, chaque enseignant corrige "sa" partie. Il n'est nul besoin de concertation et d'harmonisation. C'est la solution qui a été retenue par le Ministère de l'Agriculture.

6. LES DERNIÈRES RÉFORMES : LA CRÉATION DES BACS PRO (1996)

dans la ligne
des précédentes
réformes...

Fondamentalement, la réforme des bacs Pro. se situe dans la ligne des précédentes réformes de l'enseignement agricole. L'architecture est de nouveau centrée sur des modules dont on distingue deux catégories : les modules d'enseignements généraux communs à tous les bacs Pro. de l'enseignement agricole (MG) et des modules professionnels communs à tous les bacs Pro. (MP, MP2, MP3 et MP4) ou spécifiques à la spécialité professionnelle.

À cela s'ajoutent 14 à 16 semaines de formation en milieu professionnel.

Notons cependant que dans le bac Pro., si la biologie-écologie intervient dans plusieurs modules, elle se trouve isolée dans

...cependant
un des modules
est
unidisciplinaire

le module MP2. Il n'est plus question ici d'organiser directement la pluridisciplinarité entre biologie-écologie (module MP2) et physique-chimie (module MP3). Cela même si des liens étroits existent toujours entre les deux modules. Ainsi, dans la présentation du module MP3, on peut lire : *"...il est fortement recommandé que des actions pluridisciplinaires avec les enseignants de biologie et ceux de disciplines techniques, soient mises en œuvre pour traiter certains points du contenu de ce module"*.

Cependant, aucune dotation horaire n'est prévue pour ces enseignements pluridisciplinaires, contrairement à ce qui existe dans d'autres modules.

CONCLUSION

une évolution
certaine des
enseignants

Malgré les difficultés et les réticences des enseignants, il ne faudrait pas conclure de ce qui précède que les réformes mises en place dans l'enseignement agricole n'ont pas provoqué des changements. Les mentalités évoluent et de nouveaux réflexes de pensée apparaissent. Nombreux sont les collègues qui nous ont fait part, lors de sessions de formation, d'expériences variées et inventives pour permettre l'expression d'une réelle pluridisciplinarité de l'enseignement. Et cela aussi bien dans les bacs technologiques, dans les bacs Pro., que dans les filières BEP et CAP agricoles.

vers une
construction
différente
des savoirs
des élèves

Il n'en reste pas moins que mettre en œuvre la pluridisciplinarité demande beaucoup de temps, d'efforts et un minimum de moyens. Cela demande un investissement beaucoup plus important en temps de préparation que dans une approche strictement disciplinaire. Mais dans l'ensemble, cela permet une appropriation et une construction différente des savoirs pour les élèves. Les transferts restent toujours difficiles à faire pour les élèves, mais, avec de l'entraînement, des résultats semblent pouvoir être obtenus notamment en classe de Terminale.

Dominique GALIANA
Lycée agricole et horticole "La Lande
du Breil", Rennes
Institut de formation de l'enseignement
agricole privé (IFEAP), Angers

THÈSES EN DIDACTIQUE DES SCIENCES SOUTENUES DEPUIS 1998

(Cette liste complète les travaux cités dans Aster 27)

BARTHES, Didier (1998). *Pour une sémiographie de la planification des actions motrices. Approche technologique d'un objet technique à visée didactique : le rugby.* Université Paris 11.

BAZILE, Joëlle (1998). *Éléments pour la formation à l'hygiène des opérateurs sans qualification du secteur agro-alimentaire.* Université Paris 7.

BEN OUADDAY, Najoua (1999). *Approche par le microscope des objets biologiques et les problèmes spécifiques liés.* Université Paris 11.

BOURAOUI, Kamel (1998). *Analyse des conceptions et étude du changement conceptuel chez les élèves tunisiens et français : conduction électrique dans les piles électrochimiques.* Université Lyon 1.

BUGERERE, Séverin (1998). *La résolution de problèmes de mécanique par les élèves du secondaire : le rôle des connaissances conditionnelles dans le processus de résolution.* Université catholique de Louvain.

CHARLET-BREHELIN, Danie (1999). *Contribution à l'enseignement-apprentissage du concept d'atome au collège.* Université Montpellier 2.

COLIN, Philippe (1999). *Deux modèles dans une situation de physique : le cas de l'optique. Difficultés des étudiants, points de vue des enseignants et propositions pour structurer des séquences d'enseignement.* Université Paris 7.

COLSON, Francis (1999). *Les représentations de l'enseignement des sciences physiques et de la technologie à l'école primaire chez les acteurs en formation initiale.* Université Nancy 2.

GALIANA, Dominique (1999). *Problèmes didactiques posés par l'enseignement expérimental de la biologie dans les classes scientifiques des lycées. Cas de la photosynthèse.* Université Paris 11.

GOBARA, Shirley Takeco (1999). *Profil conceptuel et situation-problème. Une contribution à l'analyse de l'apprentissage de la périodicité en physique.* Université Lyon 2.

KESKESSA, Bachir (1998). *Contribution à la modélisation didactique d'outils graphiques dans la maîtrise d'un processus en temps réel.* Université Grenoble 2.

LOUMOUAMOU, Aubin (1998). *Contribution à l'étude de la transposition didactique en chimie organique.* Université Grenoble 1.

LUC, Claude (1998). *Place et rôle de l'objet technique dans les programmes et l'enseignement de la physique au Lycée.* E.N.S. Cachan.

LUTZ, Laure (1999). *Contribution à l'élucidation des contenus et des modalités d'enseignement de la technologie à l'école élémentaire.* Université Bordeaux 1.

MAFFÉO, Véronique (1999). *Statut et rôle des images médicales du cerveau humain dans l'enseignement secondaire français. Approches didactiques, épistémologiques et socio-historique*. Université Claude Bernard, Lyon 1.

MALAFOSSE, Didier (1999). *Contribution à l'analyse et à la modélisation des processus de conceptualisation en inter-didactique des mathématiques et de la physique : exemple de la loi d'Ohm*. Université Montpellier 2.

MERLE, Hélène (1999). *Apprentissage des mouvements de la Terre à l'école élémentaire. D'une vision géocentrique au modèle héliocentrique*. Université Montpellier 2.

RICHOUX, Hélène (2000). *Rôle des expériences quantitatives dans l'enseignement de la physique au Lycée*. Université Paris 7.

ROBIN, Jean-François (1998). *Spécificité, structure et sens de savoirs pour enseigner la gymnastique : étude de quatre leaders de théories didactiques*. Université Paris 11.

SAURY, Jacques (1998). *L'action des entraîneurs dans les actions de compétition en voile olympique ; contribution à une anthropologie cognitive du travail des enquêteurs sportifs, finalisée par la conception d'aides à l'entraînement*. Université Montpellier 1.

SAVATON, Pierre (1998). *La carte géologique dans l'enseignement secondaire. Bilan historique et didactique, réflexions et propositions d'apprentissage*. Université Paris 7.

SOUDANI, Mohamed (1998). *Conceptions et obstacles dans l'enseignement-apprentissage de l'oxydo-réduction. Contribution à une épistémologie appliquée à la construction curriculaire*. Université Montpellier 2.

SOUDANI, Olfia (1999). *Analyse épistémologique et didactique de la démarche expérimentale en sciences physiques. Mise en place d'une démarche hypothético-déductive en travaux pratiques de classe de 4^e*. Université Montpellier 2.

SOUSA DA NASCIMENTO, Sylvania (1999). *Animation scientifique : essai d'objectivation de la pratique des associations de culture scientifique et techniques françaises*. Université Paris 6.

TERRIEN, Marie (1998). *Contribution à l'étude des échanges entre la recherche et l'enseignement supérieur (chimie)*. Université d'Angers.

VEILLARD, Laurent (2000). *Rôle des situations professionnelles dans la formation par alternance. Cas des élèves-ingénieurs de production de l'ISTP de Saint-Étienne*. Université Lyon 2.