

Chimie et biologie : figures de rencontre

To cross chemistry and biology

Maryline COQUIDÉ-CANTOR

IUFM et Université de Rouen
2 rue du Tronquet, BP 18, 76131 Mont-Saint-Aignan, France.
GDSTC-LIREST, ENS de Cachan
61 avenue du Président Wilson, 94235 Cachan, France.

Béatrice DESBEAUX-SALVIAT

Lycée Louis le Grand, 75015 Paris, France.
INRP, 29 rue d'Ulm, 75005 Paris, France.
GHDSO-LIREST, Université Paris XI, France.

Résumé

Comment aborder la biochimie dans l'enseignement de la biologie au lycée ? Cet article propose une mise en perspective pour faire émerger de nouvelles pistes de recherche en didactique des sciences. Après une approche historique et épistémologique concernant la chimie du vivant, nous analysons des pratiques de classe dans ce domaine et nous cernons plusieurs questions. Nous avançons ensuite quelques propositions pour aller vers une « transposition didactique » raisonnée.

Mots clés : *biochimie, histoire, épistémologie, transposition didactique, pratiques expérimentales.*

Abstract

How biochemistry can be initiated in the biological secondary school education ? After an historical and an epistemological approach, we analyse practices in science education and we envisage a controlled « didactic transposition ».

Key words : *biochemistry, history, epistemology, didactic transposition, laboratory work.*

Resumen

Cómo abordar la bioquímica en la enseñanza de la biología en el liceo ? Este artículo propone una perspectiva para hacer emerger nuevas pistas de investigación en didáctica de las ciencias. Después propone una aproximación histórica y epistemológica relativa a la química del viviente, se analizan prácticas de clase en ese dominio y se formulan varias interrogantes. Seguidamente, algunas proposiciones son planteadas para avanzar hacia una « transposición didáctica » razonada.

Palabras claves : *bioquímica, historia, epistemológica, transposición didáctica, prácticas experimentales.*

Le problème des relations entre la biologie et la chimie dans l'enseignement est complexe, mais généralement ignoré ou sous-estimé. Ce problème prend toute sa signification dans les lycées, où la plupart des contenus enseignés en « sciences de la vie » s'appuient sur des concepts issus de la biochimie, discipline née de la rencontre entre biologie et chimie. Si l'on se réfère au cadre théorique bâti par Chevallard (1985), on constate qu'il n'existe pas, en ce domaine spécifique de la biochimie, de processus didactique menant du savoir savant au savoir à enseigner. Les nouveaux développements de la science entrant très vite dans les programmes, leur enseignement se traduit par un empilement de connaissances à la fois nombreuses et récentes. La transposition didactique consiste, le plus souvent, à simplifier le savoir savant, ce qui ne facilite ni sa compréhension, ni son appropriation par les élèves. Juxtapositions de connaissances empilées sans relation avec de réels problèmes scientifiques, ces savoirs scolaires ne fonctionnent pas comme des savoirs opérants (Orange, 1997). De plus, cette entrée rapide des résultats de la recherche dans l'enseignement secondaire, sans recul épistémologique, s'accompagne d'une perte de leur signification biologique, le travail de l'enseignant conduisant parfois à « *dissoudre le contenu du concept* » (Rumelhard, 1987).

Nous ne souhaitons pas, dans ce texte, aborder les questions d'interdisciplinarité, ni étudier le problème de l'utilisation de la chimie

considérée comme discipline de service (Martinand, 1992) dans un apprentissage biologique. Ces thèmes nécessiteraient un autre développement. Notre réflexion a pour ambition d'aider à « rebiologiser » les contenus de l'enseignement des « sciences de la vie » au lycée et de contribuer à caractériser en quoi un enseignement peut être scientifique. Elle aborde les questions de matrices disciplinaires (Develay, 1995) et de structuration des disciplines, en utilisant l'exemple emblématique de la chimie biologique.

Nous nous limiterons à la biochimie avec trois questions essentielles : quelles peuvent être les différences entre une approche chimique et une approche biologique de la chimie du vivant ? Quel sens donner au savoir biochimique quand on a oublié son origine et sa destination ? Comment aider les lycéens (et d'abord, en amont, leurs professeurs) à affiner leur perception des problèmes biologiques dans l'enseignement de la biochimie en « sciences de la vie » ?

Notre réflexion s'est développée selon trois axes :

– le premier conduit à *préciser les processus de structuration de la biochimie sur un plan historique* ;

– le deuxième vise à *clarifier sur le plan épistémologique la signification d'une approche biochimique du vivant* ;

– le troisième a pour but de *caractériser des pratiques de classe relatives à l'étude de la chimie du vivant*, pour faire émerger des particularités, identifier des obstacles, et suggérer des situations pédagogiques adaptées.

1. DE LA CHIMIE DU VIVANT À LA BIOCHIMIE

La chimie et la biologie sont deux sciences étroitement et définitivement liées, même si elles diffèrent profondément par leurs objectifs. La biologie recherche les conditions et les causes des grandes manifestations de la vie dans la cellule, dans l'individu et dans les groupes vivants. La chimie est « *la science des transformations et des créations matérielles* » ; par elle, se fonde la « *cité culturelle* » (Bachelard, 1932) du matérialisme dont le champ est à jamais ouvert et illimité. L'approche chimique des processus biologiques, avec toute sa force matérialiste, représente un vaste programme de recherche pour lequel la biochimie offre un cadre conceptuel qu'intègrent la plupart des recherches récentes en biologie moléculaire, immunologie, neurophysiologie, etc.

On enseigne les résultats de la biochimie sans s'interroger sur leurs origines historiques, ni sur les questions, ni sur les démarches, ni sur le

statut même de cette discipline. Au cours de la formation des enseignants, ces problèmes ne sont que rarement abordés, alors qu'ils contribuent à structurer l'image de ce qu'est une science (Cantor-Coquidé, 1997 ; Desbeaux-Salviat, 1997b).

Dans le recueil d'articles, *La matérialité des sciences* (Clarke & Fujimura, 1996), les auteurs soulignent l'importance, pour les recherches en biologie, de l'articulation entre les outils, les tâches et leur adéquation au cours du temps. Lors de la structuration d'une nouvelle discipline, trois séries d'événements (au moins) interagissent.

1) L'une des disciplines utilise les outils conceptuels d'autres disciplines afin de résoudre ses propres problèmes originaux. Cela constitue les *déplacements de problématique*.

2) Plusieurs étapes de création, d'adaptation de nouveaux outils, de nouvelles techniques, de nouveaux modèles, de nouvelles théories sont nécessaires. Ces nouveautés sont un des *moteurs* de la discipline naissante.

3) La discipline doit s'affranchir des *obstacles* opposés à la marche de ses idées.

Par la suite, la standardisation des techniques apparaît comme un facteur fondamental pour stabiliser une nouvelle discipline. Enfin, même si nous ne développons pas cette dimension dans ce texte, la nouvelle discipline n'acquiert la reconnaissance des praticiens et la reconnaissance institutionnelle qu'à la suite d'un effort de diffusion et de développement d'une action disciplinaire spécifique.

La biochimie est apparue comme discipline autonome à la charnière des XIX^e et XX^e siècles. L'élaboration d'un questionnement spécifique et d'une méthodologie originale, caractéristiques de cette nouvelle discipline, a nécessité près d'un siècle.

1.1. Les déplacements de problématique

Le mot biochimie est récent, puisqu'il date du début du XX^e siècle (précisément de 1903, selon A.L. Lehninger, 1973). « *De fait, l'association de la chimie et de la biologie, dans le sens plein et riche que Liebig dans son enthousiasme décrivait naguère comme tellement désirable, n'eut jamais lieu en quelque pays que ce soit dans les limites du XIX^e siècle* » (Hopkins, 1913, p. 652), commentait Hopkins, premier titulaire de la chaire de biochimie créée à l'Université de Cambridge, dans une conférence de la British Association for the Advancement of Science, « *aujourd'hui sur le continent européen et plus encore en Amérique, la biochimie (avec ce nouveau nom*

pas très heureux) a vu soudainement son règne arriver » (Hopkins, 1913, p. 652).

Tout comme nous nous devons de souligner la mauvaise construction de ce mot désormais convenu et inévitable. En effet, contrairement à ce que son étymologie laisse entendre (bio : vie, associé à chimie), il n'y a pas de chimie spéciale qui aurait des lois ou des concepts spécifiques. Un objectif fondamental de la biochimie est de décrire, de comprendre, de rendre compte des implications physiologiques et pharmacologiques des réactions chimiques du vivant et de ses multiples régulations. Cet objet a évolué au cours du temps.

L'analyse historique des problématiques nous a amenées à distinguer trois paradigmes successifs pour la biochimie : un paradigme structural, un paradigme dynamique, un paradigme évolutif.

1.1.1. Paradigme structural

Les chimistes organiciens se sont tout d'abord efforcés d'identifier l'énorme variété des composés provenant du vivant et d'en faire l'analyse. La généralisation de l'importation des instruments et des techniques chimiques, dans les études physiologiques et pour analyser les phénomènes biologiques, remonte à Liebig (1803-1873), fondateur d'une *chimie biologique*.

Si les chimistes parvenaient à analyser et identifier de nombreuses espèces chimiques des organismes, ils ne savaient pas les synthétiser. Quelques synthèses de composés organiques avaient, certes, réussi (Wöhler pour l'urée, Kolbe pour les acides salicylique et acétique), mais il s'agissait là de réactions exceptionnelles et non d'une méthode générale. La fabrication de molécules aussi complexes et aussi spécifiques semblait dépendre d'une force vitale, impossible à contrôler au laboratoire. Au milieu du XIX^e siècle, la chimie organique, en associant les concepts et les méthodes provenant de la physique a pu dépasser ces obstacles. Une chimie physique, constituée à partir de la thermodynamique, permettait de calculer l'énergie utilisable des composés et les vitesses des réactions, d'étudier les équilibres. Peu à peu, ces règles s'appliquent à la chimie organique et contribuent à lever l'obstacle de la force vitale.

La question des synthèses organiques se posait, par ailleurs, en d'autres termes. Ainsi, pour Berthelot, il était nécessaire de mettre au point une méthode qui permette de parcourir une série de composés organiques. La production d'hydrocarbures simples (acétylène ou éthylène) était rendue possible, par l'union directe de carbone à l'hydrogène, sous l'influence d'un arc électrique. Par une suite de substitutions, on parvint ensuite à fabriquer

plusieurs carbures d'hydrogène, établissant ainsi un lien définitif entre chimie minérale et chimie organique.

Enfin, avec l'impossibilité de produire au laboratoire la dissymétrie moléculaire rencontrée dans les composés naturels, en particulier les produits de la fermentation, la chimie organique se heurtait à des problèmes concernant la forme et l'espace. Pour certains (Liebig, Berzélius), la fermentation était la propriété de certaines substances organiques. Pour Pasteur, elle était le signe de la présence spécifique d'un microorganisme. Ce ne fut pas sans mal, avec des réticences qui provenaient aussi bien des naturalistes que des chimistes, que Pasteur a spécifié une chimie du vivant (Cantor, 1994). Ses travaux sur la dissymétrie moléculaire et son importance physiologique contribuèrent à spécifier cette chimie biologique. « *Je dois avouer que mes recherches sont dominées depuis longtemps par cette pensée que la constitution des corps, en tant qu'on l'envisage du point de vue de sa dissymétrie moléculaire, toutes choses égales d'ailleurs joue un rôle considérable dans les lois les plus intimes de l'organisation des êtres vivants et intervient dans leurs propriétés physiologiques les plus cachées* » (Pasteur, 1857, cité par Jacques, 1995, p. 98).

1.1.2. Paradigme dynamique

Il ne s'agit plus d'analyser chimiquement la matière des êtres vivants mais d'expliquer des fonctions proprement biologiques par articulation de processus chimiques. Dans toute interrogation de « physiologiste » est intégré un questionnement sur la chimie du vivant pour une fonction biologique déterminée (déjà présent dans les travaux de Lavoisier sur la respiration), au niveau de l'organisme (par exemple dans les travaux de Claude Bernard), au niveau des tissus (dans les études de Paul Bert par exemple), ou au niveau des cellules.

Avec l'avènement de la théorie cellulaire, le questionnement relatif à la chimie du vivant s'est orienté sur les processus de synthèse et de transformation des constituants des êtres vivants, autrement dit sur leur métabolisme. De statique, la chimie du vivant devint *dynamique*. Elle s'occupe d'approcher les connaissances des structures ultramicroscopiques des cellules, en rapport avec leur rôle dans le déroulement et la régulation du métabolisme. Hopkins dénonçait, en 1913, la négligence de certains chimistes envers les substances présentes en petites quantités dans les systèmes vivants et déplorait qu'ils ne s'intéressent qu'aux produits d'accumulation. Or, si l'on envisage le vivant d'un point de vue dynamique, on comprend que ces substances peu abondantes puissent jouer un rôle essentiel comme intermédiaires du métabolisme (Desbeaux-Salviat, 1997a). Ainsi, dans les années 1910, Hopkins en particulierisant la chimie biologique fonde les grandes orientations de la recherche en biochimie. Dans sa

conférence, il attire l'attention des jeunes chercheurs en ces termes : « *Je voudrais signaler aux jeunes chimistes qui forment le projet de s'occuper de problèmes biologiques, la nécessité de consacrer un ou deux ans à une deuxième discipline. Celui qui va simplement vers un institut de biologie avec une formation qui le prépare à déterminer la constitution de produits nouveaux provenant de l'animal et à étudier leurs réactions in vitro, sera certes utile, et pourra être reçu ; mais il ne deviendra pas un biochimiste. Ce que nous voulons, c'est savoir comment la réaction se passe dans l'organisme* » (Hopkins, 1913, p. 667).

Les premières décennies du XX^e siècle sont marquées par un développement remarquable des études relatives au métabolisme intermédiaire (Holmes, 1996). Dans le cas de la formulation du cycle de l'acide citrique, toutes les réactions chimiques impliquées ont été décrites par des chimistes, mais seule la *problématique biologique* développée en 1937 par Krebs a permis de réunir les données éparses pour leur conférer une signification (Desbeaux-Salviat, 1997a).

Rencontres et divergences aboutissent à la structuration de nouvelles disciplines. Ainsi ont pu naître différentes perspectives de recherche à partir de la chimie et de la biologie : la *chimie organique*, qui s'intéresse à l'analyse et à la synthèse chimique des matériaux du vivant ; la *chimie biologique* puis la *biochimie* qui développe une problématique plus spécifiquement biologique et dynamique sur ces matériaux ; la *microbiologie*, qui a bénéficié de procédures chimiques pour fonder une discipline consacrée à la connaissance des microorganismes.

1.1.3. Paradigme évolutif

Les déplacements de problématiques scientifiques vont de pair avec le développement des outils et des tâches. Ils sont en perpétuelle évolution. Le débat biochimique actuel rejoint de nouveau le problème des origines de la vie ; il s'exprime autour de l'idée que « la vie vient d'ailleurs ». Par exemple, sous la rubrique « biochimie », la revue *Sciences et Avenir* de novembre 1997 publie un article intitulé « Les origines extraterrestres de la vie » (Muzerelle, 1997). Avec les explorations spatiales, dans les années 1970, l'étude des possibilités de vie ailleurs que sur Terre et de leurs conséquences est entrée officiellement dans le domaine scientifique. C'est vers cette même époque que le biologiste Joshua Lederberg, Prix Nobel de médecine et de physiologie en 1958, trouvant l'expression « biologie extraterrestre » trop difficile à prononcer, proposa le mot « exobiologie » (relaté par Cooper, 1980), pour désigner la recherche et l'étude de la vie en dehors de notre planète. La signification de ce terme a dérivé progressivement, pour désigner l'appellation du domaine scientifique regroupant les études liées aux problèmes de la vie extraterrestre, aux

processus qui pourraient y conduire, et plus généralement à l'étude de la vie et de ses origines dans l'univers.

On retrouve, dans l'exemple de l'exobiologie, née de l'exploration spatiale, un cas de développement rapide des idées, faisant passer le problème de la vie dans l'Univers du domaine de la métaphysique à celui des sciences académiques. La biochimie n'est plus utilisée seulement pour comprendre la physiologie et le métabolisme des organismes actuels (étude des causes proximales) mais servirait à comprendre les mécanismes de l'évolution (étude des causes ultimes). La biochimie a acquis une autonomie, une identité suffisamment marquée pour qu'elle intervienne désormais dans la structuration de nouvelles sciences.

1.2. Un moteur : l'évolution des techniques

La composante technique et ses évolutions sont souvent négligées dans la présentation d'une matrice disciplinaire. Parmi les instruments et les procédés fondamentaux impliqués dans l'évolution de la biochimie soulignons, en particulier, ceux qui sont en relation avec des problèmes de mesure et de séparation des constituants, l'importance des techniques de microdosage, les colorations, la maîtrise des tampons, l'utilisation des isotopes radioactifs, etc.

L'alternance de validations, expérimentales dans la confrontation au réel et sociales dans la confrontation aux pairs, peut être à l'origine de modifications des théories et des modèles ; elle sollicite également une évolution des procédures techniques. Prenons le cas de la controverse sur la génération spontanée : quand Pasteur rend publics ses résultats, ses contradicteurs pointent des insuffisances théoriques qui le conduisent à relativiser sa théorie (notamment à propos de la répartition des germes), à effectuer des tests de réfutation des pratiques expérimentales de ceux qui le contredisent et à perfectionner les gestes techniques qui contribueront à fonder la microbiologie (Cantor, 1994).

L'évolution de l'instrumentation et des procédures intervient fortement dans l'investigation scientifique... mais pas systématiquement de façon positive. Par exemple, la littérature pédagogique laisse souvent penser que les étapes du métabolisme intermédiaire ont été identifiées grâce à l'utilisation d'isotopes radioactifs. Dans le cas des modélisations successives du cycle de Krebs, l'utilisation de ces isotopes a en fait conduit, dans un premier temps, à des interprétations erronées, qui ne faisaient jouer à l'acide citrique qu'un rôle annexe et qui ont momentanément entraîné un recul de la connaissance scientifique (Desbeaux-Salviat, 1997b). Les modèles se modifient, évoluent dans le temps : intégration ou non de l'acide citrique

dans le cycle qui perd alors son nom de « cycle de l'acide citrique » pour prendre celui de « cycle des acides tricarboxyliques » ; précisions des étapes intermédiaires (réactions unidirectionnelles ou pas, désignation de nouveaux intermédiaires réactionnels plus ou moins hypothétiques), etc. Toutes ces précisions sont importantes, elles aident à comprendre le métabolisme intermédiaire et pas seulement l'aspect énergétique du fonctionnement de la cellule.

1.3. Des obstacles productifs : vitalité et réduction

« *Il est remarquable* », soulignait Bachelard, « *que, d'une manière générale, les obstacles à la culture scientifique se présentent toujours par paires* » (Bachelard, 1969, p. 20). Pour inventer des procédés d'analyse et d'investigation du vivant, il est nécessaire de surmonter deux paires d'obstacles qui interagissent : *vitalisme et mécanisme, réductionnisme et holisme*.

La problématique du biologiste est différente d'une problématique uniquement physico-chimique. La décomposition, l'analyse du « *niveau d'organisation supérieur* » par « *un niveau d'organisation inférieur* » (Jacob, 1970) principe méthodologique de réduction du vivant, s'oppose à la prise en compte de la « *totalité* ». Décrire les réactions chimiques isolées en tubes à essais constitue un progrès, mais ne suffit pas. Le métabolisme est localisé, régulé, adapté aux changements de milieu : les réactions chimiques du vivant sont couplées en chaînes, en cycles, en réseaux, dans des conditions spatio-temporelles particulières. Voilà ce qui conduit à se préoccuper de la « *vitalité* » du vivant, en plus de sa « *matérialité* ».

D'une manière générale, on range, sous la dénomination de vitalisme, les théories biologiques qui tendent à distinguer nettement les processus vitaux des autres phénomènes physiques ou chimiques. Les analyses épistémologiques de Bachelard et de Canguilhem ont mis en évidence qu'un vitalisme latent pouvait se développer dans l'inconscient, avec une valorisation de la vie et de la mort. Si, depuis la moitié du XIX^e siècle jusqu'au début du XX^e siècle, le vitalisme classique s'est réduit peu à peu à une illusion de théorie scientifique, on doit reconnaître qu'en certains de ses aspects, le recours à une prise en compte de la « *vitalité* » reste une tendance naturelle de toute science qui tente de rendre compte de la spécificité des phénomènes biologiques étudiés.

C'est en reconsidérant les critères différenciateurs de l'organique et de l'inorganique que Pasteur a institué la problématique de la chimie du vivant. Pendant ses dix premières années de recherche, il a su établir une liaison originale entre deux disciplines, la cristallographie (chimie) et la

polarimétrie (physique) dont les problématiques étaient jusque-là demeurées autonomes. Il pense avoir découvert une originalité profonde du vivant en identifiant les causes de l'isomérisation optique. Il imagine que l'une des caractéristiques fondamentales de la vie est de choisir l'une des deux formes dissymétriques d'un constituant organique (exemples de l'acide tartrique, de l'alcool amylique). Cette idée s'est avérée fabuleusement productive. L'association de méthodes inaugure de plus une science fondamentale : la stéréochimie.

Dès le début du XIX^e siècle, l'approche expérimentale des chimistes, « maîtres du feu », se présente en contradiction avec celle des biologistes, soucieux de l'organisme et du maintien des conditions de viabilité. Chauffant, hachant, broyant, le chimiste « torture la nature » pour mieux la mettre « à la question ». Pasteur, qui défend une certaine spécificité de la chimie du vivant, apparaît comme vitaliste contre les chimistes (tel Berthelot), mais non moins chimiste contre les vitalistes (tel Pouchet). Fort soucieux du maintien des conditions de viabilité, il utilise, lors de la controverse sur l'origine des micro-organismes des années 1860, des ballons à cols effilés. Il invente ainsi un procédé qui permet de séparer, sans détruire par ébullition (Cantor, 1995). Un débat reprendra lors de la compréhension du rôle des « ferments » : certains « ferments », très instables, paraissent indissolublement associés à la matière vivante, alors que d'autres ne le sont pas. Pour une approche réellement biologique de la chimie du vivant, il faut donc concilier une méthodologie respectant la vitalité et l'analyse matérielle physico-chimique (Cantor, 1994). La méthode d'analyse sur les extraits des tissus, mise au point ensuite par Büchner et qui constitue une méthode essentielle pour les biochimistes, permettra par la suite d'intervenir dans une réaction.

Hopkins, dans les années 1910, lutte contre les croyances des vitalistes. Il souhaite faire évoluer les conceptions anciennes qui postulent que toutes les substances chimiques introduites dans l'organisme sont intégrées au sein d'une « molécule » géante, le biogène. Il s'oppose aussi à l'idée que les mécanismes intimes du vivant sont si obscurs qu'on ne pourra jamais les décrire. Il a la conviction que la cellule vivante est formée de molécules simples, susceptibles, par réduction, d'être décrites grâce à la chimie structurale. Ces molécules simples sont transformées grâce à des réactions chimiques catalysées par des enzymes spécifiques. Peut-on pour autant réduire la biologie à la chimie ? Non, soutient Hopkins, le vivant « crée l'inattendu », et sa compréhension passe par une sensibilité particulière du chercheur (Desbeaux-Salviat, 1997a).

La biochimie montre que la spécificité du vivant ne peut résider ni dans des lois physico-chimiques qui lui seraient propres, ni dans une force vitale organisatrice. « Mais une fois qu'elle a dit cela », commente Pichot,

« elle s'interdit, par ce seul propos de parler de la spécificité de l'être vivant » (Pichot, 1993, p. 938). Ce problème reste au cœur de la biologie. Le recours aux notions de complexité, d'auto-organisation, d'émergence tente de concilier évidente originalité du vivant et stricte observance des lois physico-chimiques.

2. POUR UNE APPROCHE BIOLOGIQUE DE LA CHIMIE DU VIVANT

En principe, les molécules du vivant ne diffèrent pas des autres molécules, pourtant certaines sont spécifiques et aptes à réaliser une fonction particulière. Citons les acides nucléiques dont la séquence dans l'ADN peut être traduite en polypeptides ou protéines. Parmi ces protéines, les enzymes servent de catalyseurs dans les processus métaboliques. Les phosphates permettent les transferts d'énergie, les lipides sont utiles à l'édification des membranes. Les molécules du vivant sont généralement plus complexes que les molécules de faible masse moléculaire du monde inanimé. Et ce n'est pas parce qu'on connaît la structure d'une substance qu'on en déduit pour autant sa fonction. Le fonctionnement du vivant étant sélectif, régulé, adapté, la problématique du vivant ne se réduit pas à une problématique uniquement physico-chimique (Canguilhem, 1965).

2.1. Originalités de la chimie du vivant

Même si les lois de la chimie permettent de décrire les phénomènes biologiques, les réactions les plus évidentes du point de vue du chimiste ne sont que rarement celles qui se produisent dans les systèmes vivants. Les bilans chimiques sont parfois trompeurs. Sénequier, par exemple, croit en 1782 avoir montré expérimentalement que le CO_2 se décompose en carbone et oxygène lors de la photosynthèse. En 1910, Duclaux, sans remettre en cause véritablement cette interprétation des phénomènes, n'exclut pourtant pas d'autres possibilités et souligne l'ignorance dans laquelle on se trouve pour décrire les étapes intermédiaires et les mécanismes réels de la photosynthèse. L'étude du vivant, par les méthodes de la chimie, a longtemps rebuté les analystes (Hopkins, 1913). Il est, en effet, fondamental de se poser la question de la signification biologique des produits analysés. Est-ce qu'un produit a une importance structurale, fonctionnelle ou ne s'agit-il que d'un déchet métabolique ? Ainsi, des produits ont été considérés comme des déchets alors qu'ils pouvaient être importants : c'est ainsi que l'ADN, extrait pour la première fois du pus par Miescher en 1868, est d'abord rangé dans la catégorie des substances sans intérêt (Raichvarg, 1997).

2.1.1. Unité du vivant

Il est classique de souligner que les êtres vivants présentent un certain nombre de molécules (en particulier des macromolécules tels les acides nucléiques et les protéines) et de réactions qui ne se trouvent pas dans les objets inanimés. Cette composition représente un des arguments fondamentaux dans l'unité du vivant. Cette analyse ne suffit cependant pas à caractériser le phénomène de vivant et l'analyse chimique est « *impuissante à établir une différence essentielle entre un corps inanimé et un cadavre* » (Duclaux, 1910, p. 226). Une telle approche peut arriver à ne considérer les êtres vivants et les objets animés que comme une collection d'objets, qui ne diffèrent les uns des autres que par leurs caractères chimiques (Pichot, 1993).

Tous les organismes possèdent un programme génétique, issu d'une histoire évolutive et constitué d'acides nucléiques (ADN ou ARN). Ce programme peut contrôler sa propre réplication et celle d'autres systèmes tels les organites cellulaires (mitochondries), les cellules et les organismes entiers. Des mutations, sources de la variation génétique, peuvent survenir. L'étude des variations, même minimales, de ces molécules présente cependant des intérêts biologiques fondamentaux (par exemple l'étude des maladies génétiques peut contribuer à décrire des mécanismes physiologiques, la comparaison de molécules d'ADN est utilisée pour proposer différents modèles de reconstitution phylogénétique).

2.1.2. Complexité et organisation

Dans les systèmes vivants, la complexité existe à tous les niveaux (molécules, cellules, organes, organismes, populations, écosystèmes). Les mécanismes de rétroaction sophistiqués, précis et complexes, présents dans les systèmes vivants n'ont pas d'équivalents dans les systèmes inanimés (Rumelhard, 1994 ; Giordan, 1995). En effet, la plupart des fonctionnements vitaux, marqués par la polyfonctionnalité, établissent entre eux des relations multiples (Debru, 1990) et il faut prendre en compte l'organisation en systèmes du vivant (sous-systèmes, systèmes de systèmes, systèmes de systématisation) qui sont aussi des *niveaux d'intégration* (Jacob, 1970).

2.1.3. Totalité du vivant

La réduction de l'organisme à un niveau inférieur arrête certains phénomènes (les comportements, la reproduction, certaines régulations, etc.) mais en laisse se poursuivre d'autres. La structure chimique, aussi précise soit-elle, renseigne rarement sur la fonction ; à ce propos, l'exemple

des hormones développé par Guy Rumelhard (1987) est éclairant. La structure spatiale des macromolécules se révèle fondamentale d'un point de vue biologique. Par les propriétés d'allostérie, la morphologie changeante de ces molécules constitue une clé de leur fonctionnement biologique (immunité, récepteurs, etc.)

Depuis les travaux de René Joachim Henri Dutrochet (qui modélisa en 1827 le phénomène d'osmose), on explique le fonctionnement des membranes cellulaires en termes physico-chimiques et c'est un progrès, mais ce n'est qu'une étape. Pour aller au-delà de ce qu'on appelait le « matérialisme » de Dutrochet, il apparaît indispensable d'expliquer que le fonctionnement est :

- sélectif (spécificité du passage des substances),
- régulé (maintien de concentrations de substances de part et d'autre de la membrane),
- adapté aux changements du milieu (et de la cellule qui augmente de volume).

Une extension indispensable, après une étape de réduction au laboratoire, est de recomposer l'ensemble qui a été détruit, avec la prise en compte, non seulement de l'organisme entier, mais aussi de la population entière qui oblige à considérer la diversité due au polymorphisme génétique.

2.1.4. Espace et temps

Une originalité de la chimie du vivant réside dans les enzymes, avec des réactions chimiques qui se présentent souvent dans des structures hiérarchisées dans l'espace (importance de la compartimentation) et dans le temps (existence de fonctionnement en cycle). La compartimentation des systèmes vivants a pour conséquence que les réactions chimiques sont beaucoup plus hiérarchisées et localisées (contrairement à ce qui se passe dans un tube à essais !) Les interactions sont spécifiques, elles sont souvent réversibles et, dépendantes essentiellement de propriétés allostériques, elles ne mettent en jeu que des énergies d'activation faibles ou nulles.

2.2. Biochimie, biologie moléculaire et biologie

Le biochimiste analyse le phénomène biologique en termes d'inventaire détaillé des molécules présentes, de leur synthèse, des réactions chimiques qui se déroulent dans l'organisme avec leurs caractéristiques cinétiques. Il établit des voies métaboliques de synthèse et de dégradation,

étudie les enzymes qui catalysent ces réactions, analyse le couplage éventuel entre ces chaînes et cycles métaboliques, identifie les processus de transduction de l'énergie. Il modélise les flux et les transferts et il tente de les relier aux structures et aux fonctions intracellulaires. À l'heure actuelle, les progrès de la biochimie sont tels que l'on peut établir de multiples connexions entre les réactions du métabolisme intermédiaire d'un organisme simple, même si la cinétique et les régulations de ces réactions ne sont pas encore bien établies.

Les êtres vivants, cependant, sont plus complexes que de simples réseaux métaboliques, en particulier avec les problèmes liés à la régulation de l'organisme. De plus, la mobilité et la sensibilité leur permettent de nombreuses interactions avec leur environnement physico-chimique, dont les conséquences resteront longtemps difficilement modélisables dans les voies moléculaires. Finalement, et comme le souligne Ernst Mayr (1989), la synthèse biochimique est tout d'abord l'affaire du vivant avant d'être celle du biochimiste ! Et les biotechnologies tentent de contrôler et d'exploiter ces formidables capacités d'activité chimique du vivant.

En biologie moléculaire, on utilise des savoirs biochimiques d'élucidation, étape par étape, de certaines voies métaboliques et des concepts issus de la génétique, pour tenter de démontrer que chaque étape est normalement contrôlée par un gène spécifique. S'interrogeant sur les molécules de l'organisme, sur leur synthèse, sur leurs modifications, sur leurs interactions et même sur leur histoire évolutive, c'est à une véritable *biologie des molécules* (Mayr, 1989 ; Debru, 1990) que s'intéresse le chercheur. Ses préoccupations essentielles se situent donc aux premiers *niveaux d'organisation* du vivant (Jacob, 1970). La biologie moléculaire, rendue conquérante par la découverte du code génétique, ne permet pas pour autant de comprendre tous les phénomènes biologiques. Elle laisse une science telle que la neurobiologie bien démunie. « *Comment* », s'interroge Claude Debru, « *étudier la relation entre le sommeil paradoxal et la mémorisation si l'on ne possède pas les principes du traitement de l'information à mémoriser ? Là est le drame de l'expérimentation actuelle, dans l'inadéquation des buts spéculatifs et des outils techniques et conceptuels* » (Debru, 1990, p. 361). Pour le neurophysiologiste expérimentateur, les concepts biochimiques ne sont que des instruments qu'il met au service de sa démarche expérimentale. La physiologie expérimentale ne peut se passer de la biochimie, mais ses pratiques et ses modes de pensée ne sont pas les mêmes

La biologie moléculaire et la biochimie appartiennent aux sciences de la vie. Cependant les sciences de la vie regroupent deux approches différentes : biologie du fonctionnement et biologie de l'évolution différent, en effet, dans leurs méthodes mais surtout dans leur questionnement. L'une

étudie les *causes prochaines ou fonctionnelles* d'un phénomène biologique, tandis que l'autre s'interroge sur les *causes évolutives* (Mayr, 1989), et ceci à tous les niveaux d'intégration du vivant. Même si une relation dialogique reste encore difficile à établir (Cantor, 1996), les deux approches (fonctionnement et évolution) sont complémentaires et beaucoup de biologistes moléculaires étudient maintenant des questions relatives à l'évolution, tandis que de nombreux biologistes évolutionnistes s'intéressent désormais à des problèmes moléculaires.

3. L'ENSEIGNEMENT DE LA BIOCHIMIE AU LYCÉE

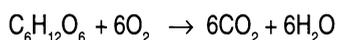
Après avoir analysé les approches historiques et épistémologiques de la chimie du vivant, nous examinons les pratiques de classe dans le domaine, et pointons les insuffisances et les ambiguïtés.

Actuellement, la biologie moléculaire est la discipline phare des « Sciences de la Vie et de la Terre » dans les lycées français. L'élève ne saurait donc appréhender la biologie sans un solide bagage en chimie. Les manuels scolaires font clairement apparaître les connaissances biochimiques comme des énoncés chimiques : on reconnaît des formules de substances organiques, des réactions figurées par des équations, etc. Mais, pour un chimiste, tout cela ressemble à de la mauvaise chimie : les molécules présentées sont inconnues de lui et souvent très complexes, les notations correspondent rarement à ses normes, les réactions sont parfois couplées, ou encore présentées sous forme de cycle. Par ailleurs, une volonté, exprimée dans les programmes officiels de présenter des problèmes de chimie en utilisant les objets des Sciences de la Vie et de la Terre contribue à entretenir une confusion certaine. L'élève perçoit-il la problématique du biologiste dans les énoncés de la biochimie, ou bien n'y voit-il que de la chimie ?

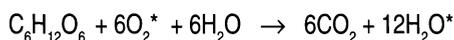
3.1. Des savoirs chimiques mal maîtrisés

Les enseignants de lycée français n'étant pas formés à la polyvalence se contentent fréquemment de pratiquer une stratégie d'emprunt. Pour se conformer aux instructions des programmes scolaires, les professeurs de biologie injectent dans leur enseignement des connaissances de chimie supposées connues des élèves (réactions chimiques, déshydrogénation, décarboxylation, oxydoréduction, etc.), tandis que les professeurs de chimie s'appuient sur des concepts de biologie sans les expliciter (écosystèmes, photosynthèse, etc.)

Dans l'enseignement de la chimie, les élèves sont rarement confrontés à des mécanismes réactionnels mais plus fréquemment à des équations-bilan. Les systèmes étudiés sont fermés, alors que les systèmes biologiques sont le plus souvent ouverts, parcourus par un flux de matière et d'énergie, et régulés. Par exemple, l'équation de la respiration habituellement présentée aux élèves est trop simple et laisse penser que le dioxygène se combine directement avec les atomes de carbone des nutriments organiques. Ce sont, en fait, des atomes d'oxygène provenant de molécules d'eau, et n'apparaissant pas dans le bilan, qui se combinent avec les atomes de carbone des nutriments organiques. Ainsi, au lieu d'écrire une équation-bilan simplifiée :



il vaudrait mieux écrire :



Bernard Darley (1996) va même plus loin, quand il affirme qu'il est parfois nécessaire de transgresser la règle des bilans équilibrés afin de ne pas induire, chez l'élève, une vision erronée de certains mécanismes biologiques se produisant dans un milieu ouvert.

Le terme « oxydation » peut aussi être générateur d'obstacles. Une enquête (Desbeaux-Salviat, 1997a) effectuée en 1993-1994 dans cinq classes de première scientifique, a montré que 43 % des élèves interrogés pensaient que l'oxydation faisait obligatoirement intervenir de l'oxygène (sens commun initial). Pour les chimistes, l'oxydation revêt une autre acception : ils raisonnent uniquement sur le plan d'une perte d'électrons par la molécule considérée. Les erreurs historiques retentissent : étymologiquement, oxydation signifie transformation en une substance acide. On pensait, initialement, que l'oxygène avait le pouvoir d'engendrer des acides et que tous les acides contenaient l'élément oxygène. Selon le degré de développement historique, les chimistes utilisent les mêmes mots mais avec des sens dérivés.

Les connaissances en chimie sont donc sources d'obstacles et entravent la compréhension des savoirs biochimiques au lycée. On se contente de citer des noms, des étiquettes qui ne signifient rien d'opérationnel pour l'élève. Il s'agit d'effectuer une sensibilisation très froide, exclusivement théorique, aux concepts de la biochimie métabolique. Pourtant, comme nous le présentons dans le tableau 1, il est possible de construire des activités pouvant interagir avec les obstacles identifiés précédemment.

Objectifs annoncés dans les programmes de lycée (connaissances à acquérir)	Réactions biochimiques Déshydrogénation Décarboxylation Oxydoréduction Conversion énergétique
Difficultés, obstacles rencontrés par les élèves	Non maîtrise du concept de réaction chimique élémentaire, alors qu'il s'agit d'appréhender un ensemble de réactions chimiques coordonnées (caractéristique du vivant) Absence de rattachement à des pratiques de référence Absence de référent empirique Absence de représentations mentales disponibles Confusion entre modèle et réalité
Pistes de remédiation	Expliciter les points communs et les différences entre approche chimique et approche biologique Travailler le concept de vivant Travailler la modélisation, l'articulation entre référent empirique et théorie

Tableau 1 : Quelques obstacles aux apprentissages biochimiques et pistes de remédiation

3.2. Un déficit de références empiriques

Que faire pour que les élèves participent davantage à leurs apprentissages en biochimie ? Pour des raisons à la fois épistémologiques, psychologiques et pédagogiques, faire comprendre le fonctionnement scientifique, ses exigences et ses limites est probablement un devoir culturel primordial. La compréhension du mécanisme dialectique de va-et-vient entre modélisation (ou théorisation) et confrontation expérimentale devrait constituer un axe fort de cette culture scientifique (Martinand et al., 1994). La question de la référence des savoirs scientifiques, en particulier celle de la constitution d'un champ de références empiriques reste, cependant, encore très négligée en didactique de la biologie. Jean-Louis Martinand (1986), dans ses travaux sur le concept d'élément chimique, souligne pourtant l'importance de la notion de référent empirique qui représente l'ensemble des expériences, faites ou évoquées, et constitue le vaste champ de positionnement de problèmes scientifiques ou d'application de connaissances.

Dans l'enseignement de la biologie, au secondaire, de nombreuses activités pratiques de biologie font largement appel à des techniques d'analyse chimique plus ou moins maîtrisées. Les plus communes consistent

à « mettre en évidence » différentes substances chimiques présentes dans la matière vivante, d'autres représentent des expériences, souvent prototypiques et servant à la « *monstration* » (Johsua, 1989) de phénomènes chimiques dans de grandes fonctions biologiques (digestion, respiration, etc.) Les questions, concernant l'intérêt de ces activités pratiques dans un apprentissage de savoirs biochimiques, sont rarement posées dans des termes de constitution d'un référent empirique et de son élargissement progressif. Les propositions de différents modes didactiques des pratiques expérimentales, que nous formulons ailleurs (Coquidé, 1998), peuvent contribuer à éclaircir ces questions.

3.2.1. Différents modes didactiques de pratiques expérimentales

Dans un registre de *familiarisation pratique* ou « *d'expérience-action* », le but des expériences (au sens large) est de donner aux élèves des occasions de pratiquer des essais, d'acquérir un savoir-faire préalable, de s'approprier des instruments et des procédures d'investigation, de développer un questionnement scientifique, et d'entrer dans un référent empirique. Nous constatons que le registre de familiarisation pratique des élèves aux objets biochimiques reste à construire. Ces référents concernent aussi bien une *phénoménotechnie* (utiliser une pipette, recueillir un gaz, choisir un matériel de verrerie adapté, etc.), qu'une *phénoménographie* comportant une fonction de représentation et d'explicitation (évoquant de l'eau de chaux qui se trouble en présence de dioxyde de carbone, de la flamme d'une bougie qui se ravive en présence d'oxygène, etc.) Les difficultés que rencontrent certains élèves par manque de ces référents empiriques sont souvent sous-estimées.

Dans un registre *d'expérimentation*, la priorité du dispositif pédagogique est de favoriser la mise en œuvre, par les élèves, d'une réelle investigation expérimentale ou documentaire à travers une recherche problématisée. Cette investigation oblige les élèves à mettre à l'épreuve leurs idées, à rechercher une adéquation entre les moyens et les fins, à s'interroger sur la validité de leurs résultats, à argumenter. Elle favorise une initiation à des démarches et raisonnements scientifiques.

Dans un registre *d'élaboration théorique*, ou « *d'expérience-validation* », les expériences, réalisées en travaux pratiques ou évoquées, sont essentiellement mises au service de la construction de concepts et de l'élaboration de modèles scientifiques. L'élève est sollicité pour effectuer de nombreux allers-retours entre référent empirique et conceptualisation. Il peut ainsi élargir le référent empirique, explorer les domaines de validité des constructions conceptuelles ou modélisantes, en éprouver la pertinence et, si possible, étendre le domaine d'application.

3.2.2. *Un exemple : la constitution d'un référent empirique pour l'enseignement du cycle de Krebs*

Ces différents modes ne représentent pas des étapes mais des moments, articulés au sein d'un apprentissage. Dans le cas du cycle de Krebs, le tableau 2 ci-joint présente une hypothèse de constitution d'un référent empirique en fonction de ces différents modes. Il intègre plusieurs essais pédagogiques innovants, testés auprès d'élèves et d'étudiants. Des observations précises ont été effectuées : elles montrent, certes, que des obstacles persistent, mais ces premières tentatives nourrissent la réflexion didactique.

Dans un mode de familiarisation pratique, les manipulations, effectuées par les élèves, dans le cadre de l'option « sciences expérimentales » de la classe de première scientifique (option supprimée en 2000), avaient pour objectifs de leur faire s'approprier des techniques d'investigation, de créer des phénomènes pour les questionner, notamment pour faire émerger un questionnement sur le vivant.

MODE DE FAMILIARISATION PRATIQUE : « EXPÉRIENCE-ACTION »

Contexte : initiation à des techniques de biochimie pour l'étude du métabolisme cellulaire.

Buts : familiariser l'élève avec le phénomène de respiration dans des broyats de muscle, développer un questionnement scientifique sur le vivant, faire progresser un savoir-faire préalable (préparer un broyat, une sonde oxymétrique reliée à un dispositif d'ExAO), faire s'approprier des techniques d'investigation (utiliser une sonde oxymétrique et un logiciel enregistreur), constituer un référent empirique (influence de l'ajout d'acides organiques, de poisons comme le malonate).

Nature du dispositif pour l'élève : exploration empirique et contrôle des actions.

Priorité de guidage de l'enseignant : partir d'un problème concret : « en quoi les organes prélevés pour faire des greffes sont-ils vivants ? », proposer des situations variées et diversifiées pour tester les propositions des élèves (Dans quelles conditions un muscle respire-t-il ? Un gros morceau de muscle consomme-t-il plus de dioxygène que du muscle broyé ? Qu'est-ce qui modifie les échanges respiratoires ?), favoriser les comparaisons, les confrontations multiples, relancer le questionnement, introduire le doute, aider à reformuler, initier une articulation entre le réel et l'abstraction (Comment a-t-on pu passer des faits expérimentaux aux connaissances théoriques sur la respiration cellulaire ?), favoriser un apprentissage technique (Desbeaux-Salviat et al., 1997).

MODE D'EXPÉRIMENTATION

Contexte : pratiques d'investigation empirique et documentaire à partir de problèmes historiques concernant le cycle de Krebs ou provenant de la situation de familiarisation (ex : interpréter l'action des poisons).

Buts : initier à des démarches scientifiques, utiliser des techniques d'investigation.

Nature du dispositif pour l'élève : mise en œuvre, en tout ou en partie, d'une réelle démarche d'investigation (recherche bibliographique, problématisation, investigation dont expérimentation, conception et réalisation de protocoles, communication, discussion).

Priorité de guidage de l'enseignant : investigation documentaire sur les problèmes effectivement rencontrés par Krebs (Desbeaux-Salviat, 1997a), aider à problématiser ou à émettre un projet (par exemple pour transposer les expériences de Krebs avec l'ExAO), favoriser la mise en œuvre des investigations, favoriser la rigueur dans la démarche de validation des élèves, favoriser les confrontations multiples, favoriser la réflexion des étudiants sur les démarches et les raisonnements qu'ils suivent.

MODE D'ÉLABORATION THÉORIQUE : « EXPÉRIENCE-VALIDATION »

Contexte : élaboration conceptuelle et modélisante du cycle de Krebs.

Buts : participer à l'élaboration d'un modèle scientifique ; élargir le référent empirique de l'application du cycle de Krebs dans le monde vivant par des expériences réalisées ou évoquées (limites de validité de ce modèle), construire l'enchaînement des étapes du cycle de Krebs en ayant accès aux procédures historiques de validation scientifique.

Nature du dispositif pour l'élève : sollicitation d'allers-retours entre registre empirique et conceptualisation.

Priorité de guidage de l'enseignant : proposer ou présenter des expériences dans les domaines de validité du cycle de Krebs pour en éprouver la pertinence, comparer les modèles historiques successifs des cycles de Krebs et les techniques associées : manométrie, colorimétrie, utilisation de molécules marquées (Desbeaux-Salviat, 1997b), généraliser l'universalité du cycle de Krebs au monde vivant aérobie.

Tableau 2 : Référent empirique pour l'enseignement du cycle de Krebs, en fonction des modes didactiques des pratiques expérimentales

Les sources historiques, sur l'évolution des problèmes scientifiques et sur les propositions successives de modélisation du cycle de Krebs, peuvent être utiles, soit pour une investigation documentaire par les élèves, par exemple dans le cadre des Travaux Personnels Encadrés, soit pour une présentation historique des recherches par l'enseignant.

Dans un mode d'élaboration théorique, d'autres expériences sont également évoquées et des activités documentaires sont proposées aux élèves, pour élargir le référent empirique et valider la modélisation du cycle de Krebs à un ensemble de vivants. Ces situations sont l'occasion de développer l'utilisation du modèle de cycle de Krebs, de le limiter au seul monde vivant aérobie, d'envisager l'hypothèse d'une apparition précoce de ce mécanisme dans l'évolution, et de le complexifier en fonction des besoins. C'est aussi l'occasion de comprendre qu'une invention scientifique naît dans un contexte donné.

3.2.3. Le rapport à l'instrumentation

L'instrumentation, en particulier celle relative à la chimie, reste le plus souvent imposée alors qu'une réflexion des élèves concernant le choix de celle-ci, son utilisation et son fonctionnement, pourrait contribuer à développer une phénoménotéchnie. Les laboratoires de lycée possèdent rarement des outils spécifiques d'analyse biochimique, tels les instruments permettant d'effectuer une électrophorèse sur gel ou les galeries pour la détection d'activités enzymatiques variées. Une utilisation modeste de tels appareils pourrait être envisagée avec, pour perspective, la familiarisation pratique des élèves à des techniques spécifiques d'analyse biochimique (histoire de l'outil, principe de fonctionnement) et la caractérisation d'une approche biochimique par rapport à une simple approche chimique.

3.2.4. La « résistance du réel »

Les enseignants apprécient les guides pédagogiques de travaux pratiques qui présentent des protocoles et des manipulations avec moult détails techniques de dosage, de composition chimique. Examinons (figure 1) l'exemple de la réalisation d'une fermentation alcoolique avec un extrait acellulaire de Levure (Pol, 1994, p. 138).

Remarquons tout d'abord, sur cet exemple de protocole proposé aux enseignants, que lorsqu'un élève manipule sur des suspensions cellulaires, il doit à la fois maîtriser le changement d'échelle, le changement de niveau d'organisation, et la signification de l'ensemble des opérations techniques qu'il doit mettre en œuvre. Toutes ces opérations successives constituent une « charge mentale » très importante, et tous ces intermédiaires, en établissant une surcharge cognitive, peuvent faire perdre de vue le questionnement biologique initial et empêcher un raisonnement efficace de l'élève.

Remarquons ensuite la précision des détails techniques donnés. Il faut être sûr « que ça marche » et que la manipulation envisagée réussisse ! Le matériel biologique, en effet, ne se prête pas facilement à l'investigation mais cette résistance elle-même peut développer une réelle interrogation scientifique. La reconnaissance de cette résistance du réel et la recherche de son dépassement représentent même des objectifs essentiels dans une investigation (Coquidé et al., 1999). La connaissance de tous ces détails techniques peut, certes, être très utile et faire gagner un temps de recherche précieux ou éviter un tâtonnement inutile, à condition d'inciter les enseignants et les élèves à un questionnement scientifique et biologique. Les questions peuvent être relatives :

– au matériel d'étude préconisé : les résultats sont ils spécifiques ou non ? Connaît-on les raisons du choix de ce matériel ? Est-il scientifique ou simplement pratique ?

– aux conseils pratiques concernant le protocole : à quoi servent certains traitements chimiques du matériel biologique ? Pour quelles raisons le protocole présente-t-il un substrat expérimental de composition chimique très précise (importance des liquides de survie, maîtrise des tampons, etc.) ?

4.5. Réalisation d'une fermentation alcoolique avec un extrait acellulaire de Levure

TEMPS: ⌚ 2 h.

DIFFICULTÉ: ▲▲

MATÉRIEL: *Levure de boulangerie, papier filtre épais, entonnoir, sable de Fontainebleau, mortier et pilon, agitateur magnétique, alcool absolu, tampon phosphate pH 6,2 (S 3.3), solution de glucose à 50 g/L (277 mmol/L), microrespiromètre ou montage du 4.1., bain-marie thermostaté, étuve, centrifugeuse.*

CLASSES: 1^{re} S et 1^{re} S option.

PROTOCOLE

Mettre en suspension 20 g de levure dans 100 mL de tampon avec 5 mL de la solution de glucose et mettre en agitation pendant quelques heures. Centrifuger les cellules et les remettre en suspension dans 25 mL d'eau distillée. Bien agiter jusqu'à obtenir une suspension bien homogène. Filtrer ou centrifuger.

Faire couler de l'eau dans le filtre ou remettre les levures en suspension dans l'eau. Recommencer jusqu'à ce que le filtrat ou le surnageant soit limpide: répéter l'opération 2 ou 3 fois pour cela.

Verser dans le filtre de l'alcool absolu et remettre les levures en suspension dans l'alcool. Recommencer jusqu'à ce que le filtrat soit limpide. En général, 2 passages à l'alcool suffisent.

Faire sécher le filtre à l'étuve à 35 °C et mettre la levure sèche dans un mortier avec une petite quantité de sable.

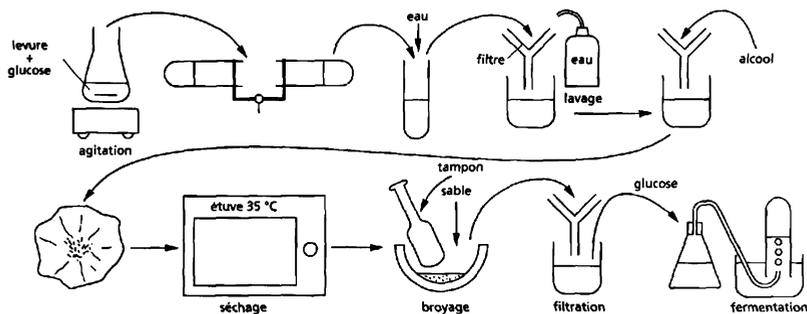
Broyer longuement et soigneusement puis ajouter du tampon phosphate (environ 50 mL) et continuer à broyer. Verser le tout dans un filtre.

Recueillir le filtrat et le mettre à incuber une heure avec un volume équivalent de la solution de glucose. Placer ensuite soit dans un montage comme celui du TP 4.1., soit dans la cuve d'un microrespiromètre et faire les mesures de dégagement de dioxyde de carbone.

EXPLOITATION

■ Les dépenses énergétiques des organismes; énergétique cellulaire; les enzymes (1^{re} S).

■ Nutrition, métabolisme énergétique et programme génétique des Levures (1^{re} S option).



17. Fermentation avec un extrait acellulaire de Levure.

Figure 1 : Travaux Pratiques de biologie. Réalisation d'une fermentation alcoolique, selon D. Pol

3.3. Des savoirs biochimiques mal contextualisés

Les buts de l'enseignement de la biochimie diffèrent suivant les filières, en particulier suivant que la filière est classique ou professionnalisée pour des carrières médico-sociales ou biotechnologiques. Dans une perspective d'apprentissage de la biologie dans une filière classique, les savoirs biochimiques peuvent être référés à des pratiques sociales ou sont abordés dans une problématique biologique.

3.3.1. Les pratiques sociales de référence

Les pratiques sociales de référence concernant la chimie du vivant peuvent être issues de la santé, avec les dosages sanguins et différents tests simples de biologie médicale (test de grossesse, test de glycosurie, etc.) Elles peuvent également provenir des usages domestiques ou industriels des biotechnologies, en particulier celles des fermentations. Les contenus de l'enseignement y font parfois référence, mais ces pratiques sociales n'apparaissent, le plus souvent, que comme un domaine d'application de connaissances biologiques, et rarement comme un domaine de problématisation. C'est essentiellement une transposition du seul savoir savant qui prédomine.

3.3.2. Les niveaux d'organisation biologique

Pour diverses raisons, pratiques, éthiques ou idéologiques, qu'il ne convient pas de développer ici, les travaux pratiques de biologie dans les lycées français se situent rarement au niveau d'un organisme. Certaines activités proposées utilisent, certes, des levures, des graines ou quelques végétaux dans leur intégralité, mais les investigations ou les manipulations chimiques proposées se situent le plus fréquemment au niveau moléculaire ou cellulaire. Le questionnement des élèves peut aborder la signification des données ainsi recueillies quand on change de niveau d'organisation biologique et/ou dans une perspective de totalité du système vivant.

Plus généralement, dans un enseignement de biologie, c'est avec une attention particulière aux relations structurelles et fonctionnelles, et avec une préoccupation évolutive, que l'apprentissage de savoirs biochimiques peut être envisagé.

CONCLUSION

À travers ce texte, nous souhaitons fournir un cadre de réflexion pour renouveler le sens de l'enseignement de la chimie du vivant, dans une

perspective d'apprentissage de la biologie en filière de lycée classique. Penser en termes d'apprentissages scientifiques, et non pas seulement de contenus, est indispensable si on ne veut pas limiter l'enseignement de la biochimie à un discours sur la science. Cette perspective borne de nouveaux champs de recherche en didactique de la biologie. De nombreuses recherches sont, en effet, à entreprendre concernant :

– de réelles transpositions didactiques, au sens élargi incluant les pratiques sociales dans la référence au savoir et les questions concernant l'axiologisation (les finalités) et la didactisation (créer de l'enseignable) ;

– le point de vue sur la discipline privilégié à chaque étape du curriculum (matrice disciplinaire), avec des interrogations concernant la structuration disciplinaire et la co-disciplinarité (étudier la façon dont une discipline scolaire peut se constituer en interaction et en rupture avec d'autres) ;

– la prise en compte, également à chaque étape du curriculum, de la question de la constitution des référents empiriques pour la construction des concepts (leur constitution, leur extension progressive).

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1932). *Le pluralisme cohérent de la chimie moderne*. Paris, Vrin.
- BACHELARD G. (1969). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris, Vrin.
- CANGUILHEM G. (1965). *La connaissance de la vie*. Paris, Vrin.
- CANTOR M. (1994). *Pouchet, savant et vulgarisateur*. Nice, Z'Éditions.
- CANTOR M. (1995). À la conquête des germes. In F. Balibar & M.-L. Prévoist (Coord.), *Pasteur Cahiers d'un savant*. Paris, CNRS Éditions, pp.121-136.
- CANTOR M. (1996). Réhabilitation de la diversité et besoin d'unité en biologie. *Trema*, n° 9-10, pp. 55-64.
- CANTOR-COQUIDÉ M. (1997). Didactique de la biologie et histoire des sciences. In J. Rosmorduc (Dir.), *Histoire des sciences et des techniques*. CRDP de Bretagne, collection Documents Actes et Rapports pour l'Éducation, pp. 335-346.
- CHEVALLARD Y. (1985). *La transposition didactique*. Grenoble, La Pensée sauvage.
- CLARKE A. & FUJIMURA J. (1996). *La matérialité des sciences (Savoir-faire et instruments dans les sciences de la vie)*. Le Plessis Robinson, Synthélabo Groupe, collection Les Empêcheurs de penser en rond.
- COOPER H.S.F. (1980). *Life on Mars*. New York, Rinehart and Winston.
- COQUIDÉ M. (1998). Les pratiques expérimentales : propos d'enseignants et conceptions officielles. *Aster*, n° 26, pp. 109-132.
- COQUIDÉ M., BOURGEOIS-VICTOR P. & DESBEAUX-SALVIAT B. (1999). « Résistance du réel » dans les pratiques expérimentales. *Aster*, n° 28, pp. 57-78.
- DARLEY B. (1996). Quand Biologie et Chimie s'affrontent : le problème des équilibres stœchiométriques. In A. Giordan, J.-L. Martinand & D. Raichvarg (Éds), *Actes des XVIII^e*

- Journées Internationales sur la Communication, l'Éducation et la Culture Scientifiques et Industrielles*. Paris, Association DIREST, pp. 497-502.
- DEBRU C. (1990). *Neurophilosophie du rêve*. Paris, Hermann.
- DESBEAUX-SALVIAT B., SALVIAT N. & COQUIDÉ M. (1997). La respiration du muscle broyé : expériences de Krebs transposées pour l'ExAO. *Bulletin APBG* 2, pp. 271-283.
- DESBEAUX-SALVIAT B. (1997a). *Un modèle biologique, le cycle de Krebs : découverte, diffusion, enseignement à l'université et au lycée*. Thèse de doctorat, Université Paris XI.
- DESBEAUX-SALVIAT B. (1997b). L'histoire du cycle de Krebs. Un exemple de retour aux publications-sources. In J. Rosmorduc (Dir.), *Histoire des sciences et des techniques*. CRDP de Bretagne, collection Documents, Actes et Rapports pour l'Éducation, pp. 191-202.
- DEVELAY M. (1995). *Savoirs scolaires et didactique des disciplines*. Paris, ESF.
- DUCLAUX J. (1910). *La chimie de la matière vivante*. Paris, Félix Alcan.
- GIORDAN A. (1995). *Comme un poisson rouge dans l'homme*. Paris, Payot.
- HOLMES F.L. (1996). Manomètres, coupes minces de tissus et métabolisme intermédiaire. In A. Clarke & J. Fujimura (Dir.), *La matérialité des sciences*. Le Plessis Robinson, Synthélabo Groupe, collection Les Empêcheurs de penser en rond, pp. 201-226.
- HOPKINS F.G. (1913). The dynamic side of biochemistry. *British Association for the Advancement of Science, 83th meeting, Birmingham*, pp. 652-668.
- JACOB F. (1970). *La logique du vivant*. Paris, Gallimard.
- JACQUES J. (1995). Les fermentations. In F. Balibar & M.-L. Prévost (Coord.), *Pasteur Cahiers d'un savant*. Paris, CNRS Éditions, pp. 95-120.
- JOHSUA S. (1989). Le rapport à l'expérimental dans la physique de l'enseignement secondaire. *Aster*, n° 8, pp. 29-54.
- LEHNINGER A. (1973). *Biochimie. Bases moléculaires de la structure et des fonctions cellulaires*. Paris, Flammarion.
- MARTINAND J.-L. (1986). *Connaître et transformer la matière*. Berne, Peter Lang.
- MARTINAND J.-L. (1992). Pratiques de références, transposition didactique et savoirs professionnels en sciences et techniques. *Séminaire de didactique des disciplines technologiques*. Cachan, ENS de Cachan, pp. 57-64.
- MARTINAND J.-L. (1993). Histoire et didactique de la physique et de la chimie : quelles relations ? *Didaskalia*, n° 2, pp. 89-100.
- MARTINAND J.-L., GENZLING J.-C & PIERRARD M.-A., LARCHER C., ORANGE C., RUMELHARD G., WEIL-BARAIS A. & LEMEIGNAN G. (1994). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris, INRP.
- MAYR E. (1989). *Histoire de la biologie. Diversité, évolution et hérédité*. Paris, Fayard.
- MUZERELLE S. (1997). Les origines extraterrestres de la vie. *Sciences et Avenir*, n° 609, p. 32.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie. Quels apprentissages pour le lycée ?* Paris, PUF.
- PICHOT A. (1993). *Histoire de la notion de vie*. Paris, Gallimard.
- POL D. (1994). *Travaux pratiques de biologie*. Paris, Bordas.
- RAICHVARG D. (1997). Décoder le réel. *Textes et Documents pour la Classe*, n° 741.
- RUMELHARD G. (1987). Formation, modification et dissolution du concept d'hormone dans l'enseignement. *Aster*, n° 5, pp. 143-170.
- RUMELHARD G. (dir.) (1994). *La régulation en biologie*. Paris, INRP.

SÉNÉBIER J. (1782). *Mémoires physico-chimiques, Tome 3*. Genève, Barthélemi.

Cet article a été reçu le 02/04/98 et accepté le 27/04/99.