

LES MANUELS, UN MODE DE TEXTUALISATION SCOLAIRE DU SAVOIR SAVANT

Michèle Grosbols
Graciela Ricco
Régine Sirota

Comment dans la sphère scolaire, la transposition didactique transforme-t-elle un objet scientifique en objet d'enseignement ?

A cette question l'analyse des manuels scolaires permet de répondre de manière privilégiée, dans la mesure où ceux-ci, mettant en œuvre programmes et instructions officielles, peuvent être considérés comme incarnant la forme scolaire du savoir.

Nous avons considéré les manuels comme des "acteurs" de la transposition didactique car ils opèrent d'une part une sélection des objets de savoir, et d'autre part une textualisation.

Trois aspects du fonctionnement de la transposition didactique du concept de respiration ont été retenus :

1) Quel savoir recouvre la notion de respiration dans les manuels ?

2) Comment l'évolution des savoirs, et l'actualité scientifique sont-elles prises en compte ?

3) Quel modèle de démarche scientifique est privilégié dans les manuels ?

Que deviennent les savoirs concernant la respiration, dans l'enseignement secondaire ? Comment dans la sphère scolaire, la transposition didactique(1) transforme-t-elle un objet scientifique en objet d'enseignement ?

A cette question l'analyse des manuels scolaires permet de répondre de manière privilégiée, dans la mesure où ceux-ci, mettant en œuvre programmes et instructions officielles, peuvent être considérés comme incarnant la forme scolaire(2) du savoir.

Si nous nous sommes centrés sur la respiration, c'est que ce concept organisateur de la biologie tout au long de son histoire jusqu'à la biologie la plus contemporaine, est enseigné de l'école primaire aux classes terminales de l'enseignement secondaire.

les manuels,
forme scolaire du
savoir

(1) Nous nous référons ici au concept de transposition didactique introduit par M. Verret et systématisé par Y. Chevallard et qui analyse "le passage d'un contenu de savoir précis à une version didactique", l'analyse de ce passage implique de pointer une distinction entre trois sortes d'objets : objet de savoir, objet à enseigner, objet d'enseignement. Le passage du savoir, à travers la constitution de ces différents objets, ne se fait pas dans la restitution exacte mais dans la "transformation", la "variation" et parfois "la substitution". CHEVALLARD Y., *La transposition didactique, du savoir savant au savoir enseigné*, Grenoble, Ed. La pensée sauvage, 1985.

(2) VINCENT G., *L'école primaire française*, P.U.L., Lyon, Ed. de la M.S.H., 1980.

les sphères
institutionnelles
de légitimation
du savoir

Afin d'analyser la transposition didactique de cette notion, nous nous sommes placés dans une perspective de reconstruction des éléments de la "chaîne didactique" qui produit et structure cette transposition, dont nous avons cherché à identifier les ancrages institutionnels à l'oeuvre dans la structuration des curricula(3).

La chaîne de la transposition didactique se constitue à partir de plusieurs sphères institutionnelles de légitimation du savoir(4).

- **La sphère de la production scientifique**, où s'élabore le savoir savant, identifiable par les communications et publications de résultats originaux.
- **La sphère de la planification didactique**, où sont prescrits les curricula formels à travers les instructions officielles, et les programmes d'enseignement assortis de leur concrétisation à travers les manuels.
- **La sphère de la formation**, où se structure la formation des maîtres à travers le cursus académique initial, dont l'Université - et les programmes des concours de recrutement (Agrégation et CAPES).
- **La sphère scolaire**, où les curricula formels sont mis en oeuvre, à travers des situations didactiques engendrant le curriculum réel.

comment le
savoir se
transforme-t-il ?

Comment le savoir se transforme-t-il au fil de cette chaîne, quels tris, quels choix s'effectuent à travers les passages successifs d'une sphère de légitimation à l'autre ? En fonction de quels débats scientifiques, et au sein de quelles institutions ces glissements s'opèrent-ils ?

Le parti pris de notre recherche(5) a été précisément de parcourir d'un bout à l'autre cette chaîne de transposition didactique, nous ne présenterons dans cet article, qu'une partie de cette étude concernant les modalités de la transposition didactique dans les manuels.

-
- (3) Nous reprendrons ici la définition proposée par J.C.FORQUIN "Un curriculum scolaire, c'est tout d'abord un parcours éducationnel, un ensemble suivi d'expériences d'apprentissages effectuées par quelqu'un, sous le contrôle d'une institution d'éducation formelle au cours d'une période donnée. Par extension, la notion désignera moins un parcours effectivement accompli qu'un parcours prescrit par une institution scolaire, c'est-à-dire un programme ou un ensemble de programmes d'apprentissages organisés en cursus". FORQUIN J.C., *Revue Française de Sociologie* XXV, 1984, "La sociologie du curriculum en Grande-Bretagne; une nouvelle approche des enjeux sociaux de la scolarisation".
- (4) Bien entendu cette chaîne de transposition didactique ne fonctionne pas dans une apesanteur sociale, elle est soumise aux enjeux sociaux des savoirs, ceux-ci se manifestant de manière plus ou moins marquée suivant les maillons de la chaîne.
- (5) GROSBOIS M., RICCO G., SIROTA R., *Le parcours du savoir dans la chaîne de transposition didactique, à propos de la respiration*, 1988. Cette recherche analyse le travail de la transposition didactique dans les différentes sphères décrites précédemment.

les manuels
acteurs de la
transposition
didactique

Nous avons considéré les manuels comme des "acteurs" de la transposition didactique car ils opèrent d'une part une sélection des objets de savoir, et d'autre part une textualisation.

Trois aspects du fonctionnement de la transposition didactique ont été retenus :

- 1) Quel savoir recouvre la notion de respiration dans les manuels ?
- 2) Comment l'évolution des savoirs et l'actualité scientifique sont-elles prises en compte ?
- 3) Quel modèle de démarche scientifique est privilégié dans les manuels ?

L'actualité du contenu des manuels nous a paru particulièrement intéressante à analyser, au moment où la mise en place d'une réforme (la réforme Haby, de 1975) a permis une actualisation du savoir, celle-ci étant d'ailleurs préconisée par les auteurs des programmes : "les choix des thèmes d'études sont dictés par le souci de familiariser les élèves avec les acquisitions récentes de la connaissance biologique et notamment dans les disciplines les plus performantes"(6).

l'actualisation du
savoir à partir de
la réforme Haby

Le manuel se trouvant à l'intersection des différentes sphères de production, d'authentification et de diffusion des savoirs, il reflète le travail de tri, de choix des connaissances, et de conceptualisation du savoir qui s'est produit par glissements successifs de celui-ci d'une sphère de légitimation à l'autre. De quels enjeux de constitution et de diffusion des savoirs, un manuel est-il donc la résultante ? Comment se construit la transposition didactique ?

Ce travail de tri et de choix des savoirs a été jusqu'à présent beaucoup plus analysé à propos des manuels d'histoire ou de littérature, mais bien peu d'études portent sur les manuels scientifiques(7).

Les manuels pourraient-ils se situer en dehors de tout débat épistémologique dans la mesure où ils ne représenteraient

(6) Ministère de l'Éducation Nationale. *Sciences Naturelles*, Classes de Seconde, Première et Terminale, p.62. C.N.D.P. (1982).

(7) Ainsi J.C.FORQUIN, dans une revue de synthèse portant sur l'approche sociologique des contenus et programmes d'enseignement parue dans *Perspectives documentaires en Sciences de l'Éducation* n°5, 1985, souligne-t-il combien peu de sociologues français se sont intéressés aux contenus et programmes d'enseignement malgré la contribution exemplaire et fondatrice de DÜRKHEIM dans *L'évolution pédagogique en France*. Certains analysent comme G.VINCENT dans *L'école primaire Française*, P.U.L., 1980, les modèles idéologiques véhiculés par les exemples des manuels de mathématiques, d'autres se situent dans une perspective plus proche de la nôtre et discutent les choix épistémologiques ou paradigmatiques des manuels. On peut alors citer dans le champ des Sciences Naturelles, les travaux d'ASTOLFI J.P. et al., (1978) et plus précisément ceux de RUMELHARD, G., *La génétique et ses représentations dans l'enseignement*, Peter Lang, Berne (1986).

le manuel,
garant social de
la compétence
professionnelle
des enseignants

comme le dit un éditeur (8) "qu'un rouage de démultiplication entre un ministère qui prend les grandes décisions et les professeurs qui sont sur le terrain avec les classes".

Que l'on considère les prescriptions officielles (au travers des notes de service définissant l'usage des manuels(9)) ou l'usage réel des manuels dans les établissements scolaires(10), force est de constater qu'il ne s'agit pas d'un support pédagogique marginal, mais au contraire central, tant du point de vue du professeur que de celui de l'élève. Son usage n'est d'ailleurs pas limité à l'enseignement secondaire, si l'on en croit les rapports du jury du CAPES de Sciences Naturelles qui conseillent la "connaissance des manuels de Sciences Naturelles des lycées et collèges afin de maîtriser les notions fondamentales et de connaître les orientations des programmes dont s'inspirent souvent les sujets exposés"(Rapport de CAPES Sc.Nat., 1985).

Jouant ainsi tant du côté de la planification didactique que dans la pratique effective un rôle de garant social de la compétence professionnelle des enseignants - à la fois sur le plan académique et sur le plan pédagogique - les manuels deviennent un des principaux vecteurs de la transposition didactique.

1. LA CONSTRUCTION DU SAVOIR SAVANT : QUELQUES REPÈRES POUR L'ANALYSE DES MANUELS

L'analyse du concept de respiration(11) a montré qu'il englobe de multiples champs de connaissances(12).

-
- (8) *Cahiers pédagogiques n°132*, Mars 1975. Interview du Directeur des manuels scolaires chez Hachette.
- (9) Note de service n°86-133 du 14 Mars 1986 - "Manuels scolaires de collèges : fonction, choix, achats à la rentrée de septembre 1986". Les textes réglementant les manuels scolaires ont été analysés par A. CHOPPIN dans une série d'articles : "Histoire des manuels scolaires : une approche globale" in *Histoire de l'Education*, Déc.1980, "Le cadre législatif et réglementaire des manuels scolaires I. De la révolution à 1939" in *Histoire de l'Education*, n° 29, janv.1986. "Le cadre législatif et réglementaire des manuels scolaires II. de 1940 à nos jours" in *Histoire de l'Education* n°34, Mai 1987.
- (10) TOURNIER A., NAVARRO M., *Les Professeurs et le manuel scolaire*, Collection Rapports de recherches, n° 5, I.N.R.P., 1985. Les auteurs dans ce rapport précisent qu'en sciences expérimentales, le manuel est jugé indispensable ou très utile par 2/3 des enseignants de second cycle, seul 3% considère les manuels comme accessoires, inutiles ou néfastes.
- (11) L'historique détaillé du concept est présenté au chapitre I du rapport : *Le parcours du savoir dans la chaîne de transposition didactique*, op.cit.
- (12) DEBRU C., *L'esprit des protéines*, Paris, Hermann, 1983.

les ruptures
épistémologiques

Historiquement(13) il apparaît comme central et organisateur de plusieurs disciplines majeures en biologie. On peut distinguer dans les approches concernant la respiration un point de vue "externe" anatomique et fonctionnel qui va du souffle à la spécification des échanges gazeux. Depuis le début du XXème siècle, les recherches sur la respiration ont parcouru les quatre niveaux successifs d'emboîtement formulés par F. Jacob dans *"La logique du vivant"*(14) à propos de l'histoire de la génétique. Le concept de respiration a été de ce fait intériorisé et soumis à une exploration biochimique puis biophysique.

L'histoire de l'élaboration de ce concept nous a mis en présence de quatre changements paradigmatiques majeurs. Il s'agit du passage de la conceptualisation de la respiration en tant que combustion, aux oxydations par déshydrogénations successives montrant que la respiration est fondamentalement différente d'une combustion, puis du passage pour interpréter la phosphorylation oxydative de la notion d'enzymes de couplage à la théorie chimiosmotique (Théorie de Mitchell).

Les nombreuses questions encore en suspens à l'heure actuelle nous montrent d'ailleurs le caractère toujours en devenir des connaissances concernant la respiration.

2. QUE RECOUVRE LA NOTION DE RESPIRATION DANS LES MANUELS DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE ?

Nous avons choisi de centrer notre analyse sur les manuels des classes scientifiques du second cycle de l'enseignement secondaire général (ce niveau représentant le degré de connaissances le plus approfondi et le plus complexe qu'offre le cycle secondaire)(15).

Notre analyse ne prétend pas à l'exhaustivité, nous avons retenu les manuels qui d'après leur vente semblent les plus utilisés dans les lycées.

La respiration est abordée dans le premier cycle des études secondaires. Elle est décrite d'un point de vue purement

(13) GIORDAN A., *Histoire de la Biologie*, Tome I, Technique et Documentation, Paris, Lavoisier, 1987.

(14) JACOB F. *La logique du vivant*, Paris, Gallimard, 1970.

(15) En effet le manuel de la collection dirigée par J. ESCALIER va jusqu'à l'exposé de la théorie chimiosmotique de la phosphorylation alors que par exemple le manuel de la collection TAVERNIER n'actualise pas le savoir jusqu'à la description des mécanismes de la phosphorylation oxydative et s'arrête à une description succincte des oxydations terminales.

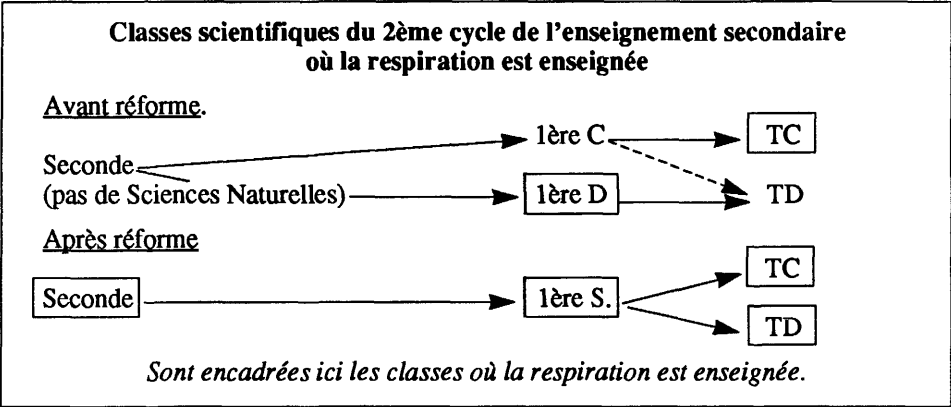
la respiration, les échanges gazeux

“naturaliste”(16) et son étude s'attache à faire reconnaître son existence universelle chez les êtres vivants, malgré la diversité de ses manifestations externes : identité de la nature des échanges gazeux, diversité des modalités de leur accomplissement, mouvements respiratoires éventuels, etc. Elle s'accompagne de notions anatomiques sur les appareils respiratoires, en particulier des mammifères et de l'homme, ce qui ramène le phénomène à l'élève lui-même. La nécessité d'un fluide de transfert des gaz de la surface d'échange de l'organisme aux organes est abordé. L'aspect de l'hygiène respiratoire est souligné. Enfin, la respiration est liée à la production de chaleur et à l'apport d'énergie nécessaire à l'activité de l'organisme. Cette présentation de la respiration, indispensable à un certain niveau de connaissances, est en dehors des recherches fondamentales contemporaines sur ce sujet et il n'y a donc pas lieu d'en étudier l'actualité scientifique.

L'exposé de la respiration dans le second cycle scientifique cadre au contraire avec notre problématique.

La réforme Haby

Avant la Réforme Haby dans les classes scientifiques du second cycle, la respiration était enseignée en Première dans la filière D ou en Terminale dans la filière C, donc dans les deux cas sur une année scolaire seulement. Depuis l'application de la réforme, elle est traitée en : Seconde, Première S, Terminales D et C, donc sur trois années scolaires au total(17).



(16) "Le naturaliste, c'est l'homme du visible structuré et de la dénomination caractéristique"
FOUCAULT M., *Les mots et les choses*, Gallimard, 1966, p.174.

(17) Ministère de l'Education Nationale, *Sciences Naturelles*, Collection : horaires, objectifs, programmes, instructions, C.N.D.P., 1977.

Ministère de l'Education Nationale, *Sciences Naturelles*, Classes de Seconde, Première et Terminale. Collection : horaires, objectifs, programmes, instructions, C.N.D.P., 1982.

Notre comparaison porte donc sur les contenus des manuels de Première D et de Terminale C (avant réforme) et de Première S et Terminale D et C (après réforme).

3. PRÉSENTATION DE LA RESPIRATION DANS LES MANUELS AVANT LA RÉFORME HABY

Pour la période que nous avons qualifiée "avant la réforme Haby", nous avons étudié un manuel de Première D (édition 1980) et un manuel de Terminale C (édition 1981).

3.1. La respiration dans un manuel de Première D avant réforme (18)

toujours les échanges gazeux

Dans ce livre de Première D, le sujet est traité sur 14 pages. Une première idée de l'importance accordée par les auteurs aux différents aspects proposés de la respiration se retrouve dans le nombre de pages respectif qui leur est consacré. La mise en évidence des échanges gazeux respiratoires (au niveau organisme, organe, tissu) prend trois pages et demie. La mesure des échanges gazeux, selon deux méthodes, suivie d'une page et demie de calculs d'intensité respiratoire (IR) et de quotient respiratoire (QR) occupe quatre pages. Si l'on ajoute à ceci trois pages consacrées aux transports des gaz (rôle du sang et de l'appareil circulatoire chez les animaux), on voit que 70% du sujet est consacré aux échanges gazeux. Ce savoir a été établi dès la fin du XVIIIème siècle et pendant la première moitié du XIXème. Il s'agit de la description de la respiration au niveau de l'agencement des surfaces et de son intériorisation au niveau des tissus (structures I et II définies par Jacob). La définition du Quotient Respiratoire (QR) et son étude datent de 1872 (Pflüger).

sur quatorze pages, trois consacrées à la respiration cellulaire

Trois pages sont consacrées à la respiration cellulaire. Le contenu de cette partie est particulièrement intéressant, puisque l'on est supposé atteindre là l'analyse du mécanisme au niveau moléculaire, c'est-à-dire son appréhension contemporaine (réactions chimiques, relations structure/fonction, correspondant à la structure d'ordre IV définie dans "*La logique du vivant*").

L'exposé de la respiration cellulaire est précédé d'un court paragraphe d'introduction rappelant des expériences attribuées par les auteurs du manuel à Paul Bert (1870) et se rapportant aux échanges gazeux d'un fragment de tissu isolé, suit leur mesure précise par la méthode de Warburg (1910). Puis la présentation de la respiration cellulaire part de la question : "*Que devient l'O₂ absorbé par un tissu et quelle est l'origine du gaz carbonique dégagé ?*". Il est précisé qu'il s'agit d'un mécanisme d'oxydation cellulaire des métabolites (ce dernier terme est défini à ce propos) catalysé par des enzymes spécifiques pour chaque réaction. L'origine du CO₂ est présentée comme le résultat du fonctionnement de "carboxylases" (Voir encadré p. 66).

● *Décarboxylations et déshydrogénations*

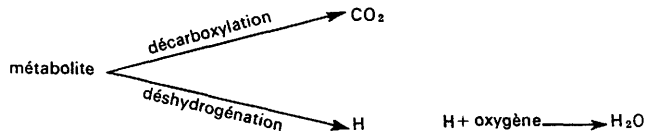
Sous l'action d'enzymes, appelées *carboxylases*, les métabolites perdent des molécules de CO_2 , qui diffusent hors des cellules : telle est l'origine du gaz carbonique dégagé par la respiration d'un tissu. Sous l'action d'autres enzymes, les *déshydrogénases*, les molécules de métabolites perdent de l'hydrogène; c'est ce qu'on exprime en disant que de l'hydrogène se trouve « mobilisé » (c'est-à-dire rendu mobile) à l'intérieur des cellules. Cet hydrogène, on va le voir, ne se dégage pas hors des cellules. Décarboxylations et déshydrogénations donnent naissance à divers composés dont l'existence est transitoire; de nombreuses enzymes participent à ces réactions.

● *Fixation de l'hydrogène par l'oxygène*

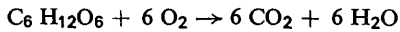
L'hydrogène « mobilisé », n'est pas sous la forme moléculaire H_2 , qui est celle de l'hydrogène libre; il est sous une forme atomique, particulièrement active au point de vue chimique, et il se combine à l'oxygène (qui, chez les animaux, est apporté aux cellules par le sang); l'oxydation de l'hydrogène donne de l'eau. La combinaison de l'hydrogène avec l'oxygène fait encore intervenir des enzymes, ainsi que des corps (appelés *transporteurs d'hydrogène*) qui facilitent cette combinaison.

Bilan des oxydations cellulaires: quotient respiratoire

On peut, en simplifiant à l'extrême, résumer comme suit les nombreuses réactions qui se produisent dans les oxydations cellulaires :



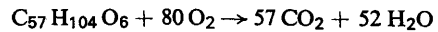
L'ensemble de ces réactions est globalement équivalent à la réaction de combustion du métabolite; ainsi, la consommation du glucose, comme nous l'avons vu (p. 221), équivaut à la réaction



d'où le quotient respiratoire $\frac{\text{CO}_2}{\text{O}_2} = \frac{6}{6} = 1$.

Si les métabolites utilisés sont des lipides, le quotient respiratoire descend à 0,7 parce que les lipides sont beaucoup

moins riches en oxygène que les glucides; ainsi, avec l'oléine, on a :



$$\text{Q.R.} = \frac{\text{CO}_2}{\text{O}_2} = \frac{57}{80} \simeq 0,7.$$

Avec les protides, enfin, le quotient respiratoire a une valeur intermédiaire, proche de 0,8. Ainsi, la valeur du quotient respiratoire d'une plante ou d'un animal - ou d'un être humain - dépend des métabolites utilisés par les oxydations cellulaires.

Il est expliqué que "sous l'action de déshydrogénases les métabolites perdent de l'hydrogène, l'hydrogène est mobilisé c'est-à-dire rendu mobile...Décarboxylation et déshydrogénation donnent naissance à divers composés...de nombreuses enzymes participent à ces réactions...L' H_2 est sous forme atomique, il se combine à l' O_2 ce qui donne de l'eau".

des explications
bien vagues

Ce qui frappe dans cet exposé, c'est la caractère vague des explications fournies : "divers composés", "de nombreuses enzymes" "la combinaison de l' H_2 avec l' O_2 fait intervenir des transporteurs d'hydrogène qui facilitent cette combinaison".

Dans le bilan des oxydations cellulaires donné sous forme d'un schéma, on retrouve la préoccupation sous-jacente de justifier les échanges gazeux. D'ailleurs les auteurs reviennent immédiatement à ces échanges en comparant les Quotients Respiratoires obtenus avec le glucose, la trioléine ou les protéines comme source d'énergie.

Ils soulignent à ce propos l'identité de l'équation de la respiration avec une combustion, point sur lequel nous reviendrons.

Les concepts très vaguement évoqués datent du début de ce siècle, tel que la déshydrogénase (Batteli et Stern, 1912). Pour le reste, le texte est si peu précis qu'il est difficile de rapporter son contenu à la respiration telle qu'on la décrit actuellement. "La combinaison de l' H_2 avec l' O_2 fait encore intervenir des enzymes ainsi que des corps (appelés transporteurs d'hydrogène) qui facilitent cette combinaison".

Cette présentation est ambiguë puisque, en réalité, l'hydrogène en tant que tel n'est pas transféré à l'oxygène, ce sont des électrons qui passent par des systèmes rédox et finalement sont cédés à l'oxygène par le complexe cytochromeoxydase et non pas par des transporteurs d'hydrogène.

Quel savoir l'élève qui a étudié la respiration a-t-il pu acquérir ?

la prégnance de
l'association
combustion/res-
piration

Essentiellement l'existence d'échanges gazeux caractéristiques. Pour faire bon poids, faire sérieux et quantifié, donc scientifique, il aura vu deux méthodes de mesure des échanges gazeux et fait deux pages de calculs sans grand intérêt. Or, les échanges gazeux ne sont en réalité que des manifestations secondaires de la respiration, même si ce sont les plus manifestes et les premières à avoir été étudiées. Replacés dans le contexte de la fin du XVIIIème siècle, les travaux de Lavoisier sur les échanges gazeux représentent un tournant décisif dans la connaissance : pour la première fois, des phénomènes vitaux étaient interprétés en terme de chimie, ce qui changeait radicalement la nature du cadre conceptuel d'études des organismes vivants.

Si la comparaison soulignée dans le livre avec une combustion est d'un intérêt historique indéniable (pour les raisons évoquées plus haut), elle peut prêter à confusion pour l'élève. La respiration n'est pas une combustion ; les étapes d'oxydation sont toutes des déshydrogénations (sauf la der-

nière). Mais, comme le fait très justement remarquer Alexandre (19) : *“La respiration/combustion ne possédait-elle pas toutes les qualités pour devenir un dogme ? Présentée par un savant qui ne faisait plus de la physiologie spéculative, cette théorie était “parlante” pour le sens commun et bien davantage pour celui du savant. Sa “simplicité” appelait une vaste adhésion. Il était inévitable que la combustion pulmonaire soit liée à celle des poêles : “véritable combustion semblable à la combustion de nos foyers” dit Claude Bernard en 1867. Il est remarquable que de nos jours, bien que la théorie de Lavoisier soit dépassée, elle continue néanmoins de vivre par le langage des plus avertis. Il est en effet courant, sinon de règle, de dire que les aliments sont “brûlés” par nos cellules ou de parler de “combustion cellulaire” et manifestement les guillemets atténuent bien faiblement la connotation des mots”.*

On retrouve donc là un obstacle épistémologique. Le livre, plutôt que d'aider l'élève à prendre conscience de cet obstacle, semble au contraire le renforcer.

3.2. La respiration dans un manuel de Terminale C avant réforme(20)

Dans la filière D la respiration était enseignée en Première, en C elle l'était en Terminale ; elle était donc traitée une seule fois dans chaque filière, le contenu du programme officiel se rapportant à ce thème était d'ailleurs strictement identique dans les deux filières, si ce n'est l'ajout de la notion de chaîne alimentaire et d'interdépendance des êtres vivants en Terminale C.

Si nous conduisons maintenant une analyse semblable à celle que nous avons effectuée sur le livre de Première D, nous constatons que la respiration y est également traitée en quatorze pages. La démarche est à peu de chose près la même (il s'agit pourtant d'une autre collection et d'autres auteurs). Ici encore 60% de l'exposé sont consacrés aux échanges gazeux, mesures assorties de calculs (Intensité Respiratoire et Quotient Respiratoire) avec quelques commentaires sur la variation physiologique de ces facteurs ; trois pages et demie sont réservées aux transferts des gaz respiratoires par le sang. Quatre pages décrivent la respiration des tissus, à laquelle nous nous sommes particulièrement intéressées, car à partir de cette notion commence l'intériorisation du phénomène.

La mise en évidence de la respiration des tissus est présentée par la description d'une expérience - la même que celle du livre de Première D - mais attribuée cette fois à

démarche peu
différente de
celle de
Première D

(19) ALEXANDRE B., “La respiration avant Magendie et Claude Bernard”, in *Bulletin A.P.B.G.* Fasc. 247, n°1, 1983.

(20) *Biologie*, Terminale C - Collection Escalier - Nathan, 1980.

Spallanzani (1804). Puis une expérimentation plus précise avec l'appareil de Warburg est exposée.

La respiration cellulaire, comme dans le livre précédent, est introduite par un questionnement sur l'origine du CO_2 "le véritable problème est de connaître l'avenir de l'oxygène absorbé et l'origine du dioxyde de carbone rejeté".

- Présentation et interprétation d'une expérience sur le devenir de l'oxygène

une
expérimentation
proposée au
niveau cellulaire

L'expérience est proposée dans le cadre d'un problème qui est posé à la fin du paragraphe précédent : "on peut donc mettre en évidence les échanges gazeux au niveau des tissus mais le véritable problème est de connaître l'avenir de l'oxygène absorbé et l'origine du dioxyde de carbone rejeté" et elle est présentée sous le titre : "Devenir de l'oxygène absorbé", qui définit la perspective dans laquelle cette expérience est montée et interprétée. Cette expérience est décrite dans le but de montrer que la respiration cellulaire s'accompagne d'un transfert d'hydrogène sur un accepteur, ici le bleu de méthylène. Le bleu de méthylène est présenté comme un substitut de l'oxygène dans les conditions expérimentales.

- Problématique et expériences originales

Pour comprendre exactement la construction de cette expérience par rapport aux expériences originales dont elle s'inspire, il est nécessaire de rappeler très brièvement le cadre de celles-ci.

origine historique
de
l'expérimentation

Ces recherches avaient pour but de comprendre comment s'opère la dégradation des métabolites intermédiaires lors de l'oxydation du glucose par les organismes vivants. Elles se plaçaient dans le cadre de l'étude générale des processus d'oxydation. Les travaux de Wieland (datant de la première décennie du siècle) portaient sur l'oxydation de molécules organiques en présence de platine colloïdal et montraient que l'oxydation pouvait se produire en l'absence d'oxygène moléculaire, par retrait d'hydrogène. Ces travaux avaient permis d'établir la théorie de l'oxydation par déshydrogénation.

Les recherches en biologie - dont l'expérience proposée dans le manuel est une transposition - avaient pour but de comprendre l'oxydation des métabolites apparaissant lors de la dégradation du glucose, catalysée par les tissus vivants, en généralisant à ceux-ci la théorie de l'oxydation par déshydrogénation établie en chimie organique. Dans ces expériences conduites par Thunberg, Batelli et Stern (1910-1920) les auteurs étudiaient le transfert de l'hydrogène depuis un acide organique, métabolite intermédiaire supposé, subissant une oxydation en anaérobiose (acide succinique, fumarique, citrique) vers un système rédox artificiel, le bleu de méthylène.

B. Devenir de l'oxygène absorbé

Le bleu de méthylène existe sous deux formes : à l'état oxydé il est bleu, c'est sa forme normale; à l'état réduit il est incolore, c'est la forme leuco-dérivée*.

Dans cinq tubes à essais on place du liquide de Ringer auquel on ajoute :

- dans les tubes 1 et 2, des Moules sorties de leur coquille,
- dans des tubes 3 et 4, des fragments de Navet.

Les tubes 2 et 4 sont soumis à une courte ébullition.

Dans chacun des tubes on ajoute la même quantité de bleu de méthylène pour obtenir une légère teinte bleue. Le tube 5 sert de témoin (fig. 15a).

Les cinq tubes sont placés au bain-marie à 37° pendant une heure puis observés : les tubes 1 et 3 sont décolorés, il y a donc eu réduction du bleu de méthylène. Le phénomène ne se produit que dans les tubes contenant de la matière vivante (fig. 15b).

Dans certaines conditions les cellules peuvent utiliser le bleu de méthylène à la place de l'oxygène. Or la réduction du bleu de méthylène est due à la fixa-

* Le bleu de méthylène est un produit commode mais il semble que d'autres substances que l'hydrogène soient capables de le décolorer, l'expérience n'est donc pas totalement satisfaisante.

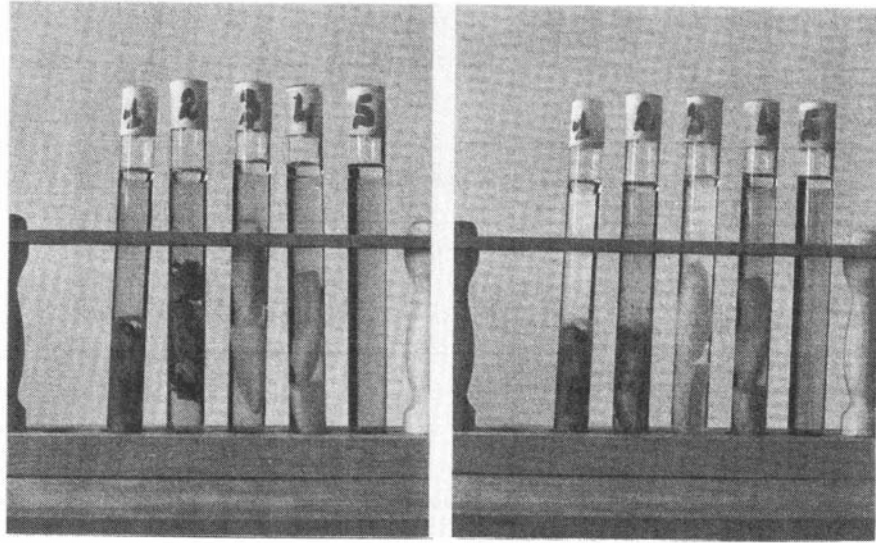
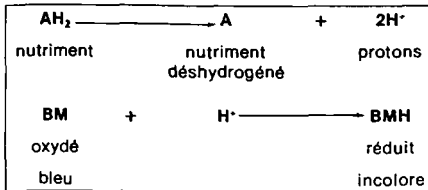


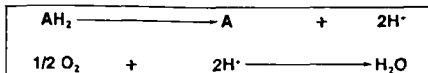
Fig. 15 Mise en évidence de la respiration tissulaire.

tion d'hydrogène atomique sur la molécule; la respiration cellulaire commence donc par une déshydrogénation: l'oxygène joue le même rôle que le bleu de méthylène c'est-à-dire celui d'accepteur d'hydrogène; le résultat est la synthèse de l'eau.

■ En présence de bleu de méthylène (donc en absence d'oxygène)

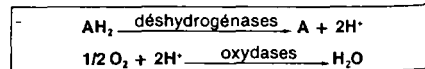


■ En présence d'oxygène



La formation de l'eau au cours de la respiration est le résultat de deux réactions successives, d'abord une déshydrogénation puis une oxydation; dans les deux cas la présence d'enzymes est indispensable.

Les **déshydrogénases** arrachent l'hydrogène des métabolites le libérant dans la cellule. Les **oxydases** assurent le transfert de l'hydrogène jusqu'à l'oxygène accepteur final.



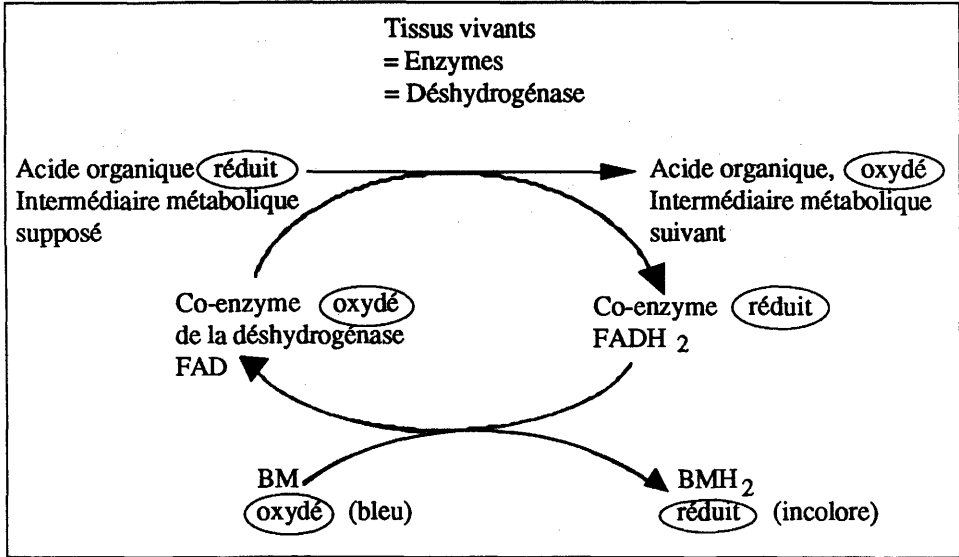
Les expériences utilisant le bleu de méthylène sont nombreuses. L'appareil de Thunberg est basé sur ce principe; on l'utilise non pas avec des cellules mais avec des extraits cellulaires.

On broie des graines de Haricot en cours de germination, on centrifuge à grande vitesse et on ne conserve que le liquide qui surnage.

Ce liquide est mélangé à du bleu de méthylène puis mis en contact avec une solution de glucose.

On assiste à une décoloration identique à celle que l'on obtient avec des tissus vivants, le liquide contient donc la partie active présente dans les cellules. Le broyage a libéré les enzymes intracellulaires.

Le système réactionnel mis en jeu peut être schématisé ainsi, il représente un ensemble de systèmes couplés d'oxydo-réductions :



De telles expériences ont permis d'identifier certains acides organiques intermédiaires de la dégradation du glucose, apparaissant par déshydrogénation en anaérobiose. Mais ce n'est qu'en 1935 que Szent-Györgyi, par des mesures précises de consommation d'oxygène, démontra que la déshydrogénation du succinate se trouvait directement impliquée dans les réactions de dégradation aboutissant à CO₂ et H₂O, montrant par là un lien entre le fonctionnement d'une déshydrogénase et la consommation d'O₂, due à la respiration.

- Mode de transposition de l'expérience dans le manuel

Transformation de perspective et de problématique

un bricolage
pédagogique

Examinons l'expérience telle qu'elle est reconstruite à des fins didactiques.

Dans le manuel, le problème n'est pas posé en termes de transfert d'hydrogène d'un métabolite intermédiaire de la dégradation du glucose vers le bleu de méthylène en anaérobiose ; l'expérience est supposée montrer directement que la respiration, au niveau cellulaire, commence par une déshydrogénation. On assiste donc à une transformation de perspective par rapport aux expériences originales. Posé ici dans le cadre du devenir de l'oxygène absorbé, l'ensemble du processus cellulaire de la respiration se trouve envisagé d'emblée.

Un protocole expérimental incohérent par rapport à la problématique

les éléments du système couplé d'oxydoréduction n'apparaissent pas tous

Pour être cohérent, le protocole expérimental proposé devrait faire apparaître clairement les éléments du système couplé d'oxydoréduction décrit plus haut. Or seuls sont mis en place les enzymes (fragments d'organes) et l'accepteur. Le donneur d'hydrogène (c'est-à-dire le métabolite qui va s'oxyder) n'est pas évoqué. Dans la formulation du résultat il est question d'un nutriment (AH_2) qui est déshydrogéné au cours de l'expérience pour donner A. Dans l'expérience proposée où situer ce métabolite intermédiaire : est-il ajouté au milieu réactionnel ? ou bien s'agit-il des substrats endogènes présents dans les tissus mis en expérimentation ? Les enzymes catalysant le transfert sont également dans les cellules, il faut donc postuler que substrats et enzymes ont diffusé dans le milieu extérieur aux tissus, puisque c'est là que l'on observe la réaction de réduction du bleu de méthylène.

L'apparition du leucodérivé (BMH_2) ne peut par ailleurs, être détectée qu'à condition de déposer une couche d'huile à la surface du milieu réactionnel, pour empêcher sa réoxydation immédiate par l'oxygène de l'air. Cette couche d'huile très visible sur la photographie n'est pas signalée dans le protocole expérimental ; la paraffine permet pourtant de réaliser effectivement des conditions approximatives d'anaérobiose, comme dans les expériences originales, conditions tout à fait logiques dans la problématique initiale.

Interprétation et généralisation erronées des résultats

la réduction du bleu de méthylène...

Lorsque l'auteur du manuel dit: *"Dans certaines conditions les cellules peuvent utiliser le bleu de méthylène à la place de l'oxygène. Or la réduction du bleu de méthylène est due à la fixation d'hydrogène atomique sur la molécule ; la respiration cellulaire commence donc par une déshydrogénation : l'oxygène joue le même rôle que le bleu de méthylène c'est-à-dire celui d'accepteur d'hydrogène ; le résultat est la synthèse de l'eau"*. Que nous propose ce commentaire ? Nous avons vu apparaître le leucodérivé du bleu de méthylène en présence de tissus vivants, et l'auteur en déduit que *"la respiration cellulaire commence donc par une déshydrogénation..."* parce que *"les cellules peuvent utiliser le bleu de méthylène à la place de l'oxygène"*. En quoi cela constitue-t-il une preuve que la réduction du bleu de méthylène que nous avons observée, soit réellement reliée à la respiration si ce n'est le fait de sa contextualisation dans le chapitre "Respiration" du manuel ?

reliée à la respiration ?

De telles oxydations par déshydrogénations sont très nombreuses et se produisent par exemple, dans le catabolisme des acides gras et des acides aminés. Les nucléotides réduits produits ne rejoignent pas forcément la chaîne respiratoire, et dans ce cas ne participent pas à la respiration cellulaire. Énoncer que le bleu de méthylène joue le même rôle que l'oxygène, sans explications supplémentaires, ne peut qu'entraîner une représentation fallacieuse.

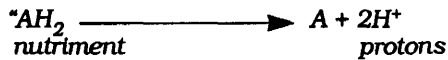
une
interprétation
distordue

La volonté d'interpréter à tout prix cette expérience en se référant à la consommation d'oxygène, en distord complètement la signification : que peut illustrer cette expérience telle qu'elle est présentée ? Seulement le fait que les cellules vivantes en anaérobiose sont susceptibles de catalyser le transfert d'hydrogène vers le bleu de méthylène, rien de plus. Mais c'est justement cet aspect de la respiration, assurant un ensemble d'oxydoréductions en dehors de l'oxygène qui est caractéristique, et différencie radicalement ce phénomène biologique d'une combustion. L'illustration expérimentale que nous venons d'analyser, en l'explicitant plus rigoureusement, permettrait de souligner cette caractéristique mais il faudrait pour cela rendre à l'oxygène sa simple place d'accepteur final.

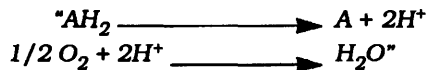
D'ailleurs les premiers auteurs avaient juste montré avec ces expériences qu'un tissu vivant en anaérobiose était capable de catalyser l'oxydation de certains acides organiques et le transfert d'hydrogène sur un accepteur ! Le rapport avec l'oxydation ultime par l'oxygène donc avec la respiration a été établi plus tard comme nous l'avons vu et au moyen d'autres expériences.

Présentation erronée du rôle des protons

Les formulations proposées pour résumer les conclusions de l'expérience décrite aux élèves sont inexactes et illogiques :

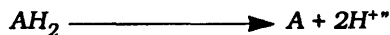


Les protons ne sont pas des équivalents réducteurs puisqu'ils représentent la forme oxydée du système $\text{H}_2/2\text{H}^+ + 2\text{e}^-$ et le bleu de méthylène oxydé ne peut donc pas être réduit par un proton ! La même remarque s'applique à la formule proposée en présence d'oxygène :

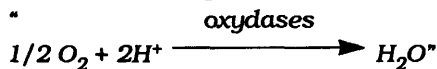


Les formules résumant le rôle des déshydrogénases et des oxydases sont incompréhensibles et, pour notre part, nous ne voyons même pas à quelles données des mécanismes respiratoires elles peuvent faire référence.

"déshydrogénases



Les déshydrogénases catalysent le transfert d'hydrogène ou d'hydrogène et d'électrons (ce que l'on appelle des équivalents réducteurs) mais pas des protons sur leurs cofacteurs (accepteurs d'équivalents réducteurs fonctionnant conjointement avec les déshydrogénases).



où passent les
électrons ?

On appelle oxydases (complexes cytochrome-oxydases) des systèmes rédox couplés qui, dans la dernière étape de la respiration cellulaire, transfèrent des électrons jusqu'à l'oxygène de l'air, qui est alors réduit en O_2^- et réagit ensuite avec les protons présents dans la mitochondrie pour donner l' H_2O respiratoire. Ces incorrections sur le rôle des protons sont d'autant plus graves que les protons ont un rôle très important dans la transduction d'énergie au niveau de la mitochondrie mais radicalement différent de celui qui est décrit ici à tort.

concept
d'oxydoréduction
jamais clairement
explicité

Il s'agit là d'erreurs de fond dénotant une incompréhension des mécanismes fondamentaux de la respiration cellulaire, qui reposent sur le transfert d'équivalents réducteurs (hydrogène ou électrons) dans des systèmes couplés d'oxydoréductions. Le concept d'oxydoréduction qui est l'une des références fondamentales de compréhension de la respiration cellulaire n'est jamais clairement explicité.

Une expérience qui "n'est pas totalement satisfaisante"

à quoi est due la
formation du
leucodérivé ?

La démonstration expérimentale de déshydrogénations au cours de la respiration cellulaire, à l'aide du bleu de méthylène, a déjà été remise en question il y a une vingtaine d'années par certains enseignants du secondaire(21). Ceci d'ailleurs, est évoqué dans le manuel étudié. La critique portait d'une part, sur la pertinence de la démonstration, le changement de couleur ne traduisant pas forcément la réduction du colorant par le fonctionnement d'une déshydrogénase mais pouvant être dû à la réduction par le glucose (sucre réducteur) ou par l'ascorbate, susceptible de transférer spontanément (sans catalyse enzymatique) des équivalents réducteurs au bleu de méthylène (potentiels standard d'oxydo-réduction très voisins). D'autre part divers artefacts sont également envisagés. Les auteurs concluent finalement que dans les conditions proposées, l'apparition du leucodérivé est bien due au fonctionnement des déshydrogénases tissulaires.

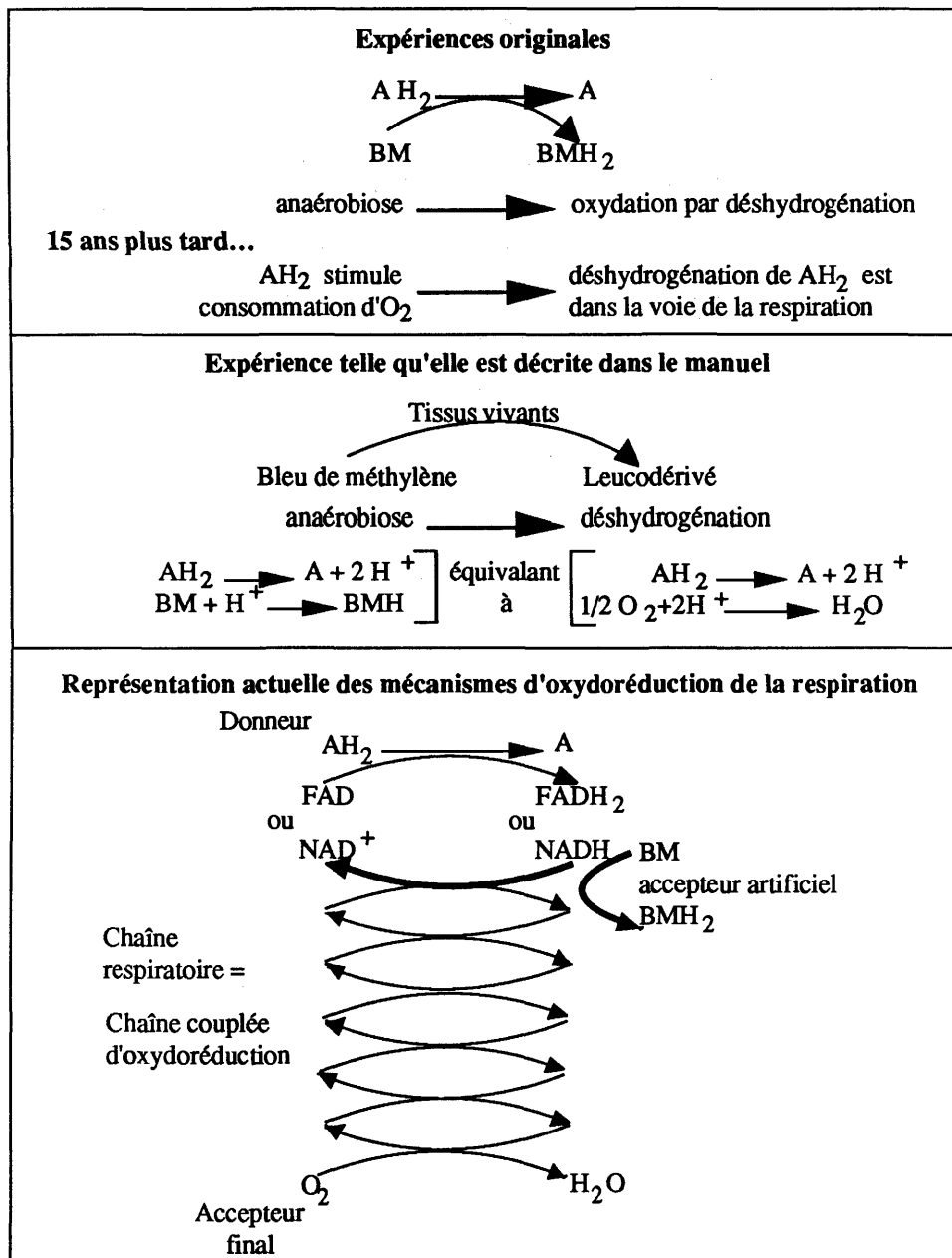
Une expérience qui pourrait être totalement satisfaisante

Pour notre part, ce type de confirmation nous semble accessoire et sans grand intérêt. Ce que nous mettons en cause est bien différent et porte sur le fond; l'expérience en classe ne sera jamais qu'une illustration puisqu'elle reprend ou s'inspire d'une expérimentation antérieure aboutie, dont les résultats sont connus et interprétés. Ceci ne lui retire aucunement son intérêt, sa vocation n'est pas de prouver une hypothèse, ce qui est déjà accompli, mais de permettre

(21) BOURGEOIS C., "Utilisation du bleu de méthylène pour mettre en évidence les déshydrogénases respiratoires" in *Bulletin de l'A.P.B.G.*, 1966.

GOHAU G. "Difficultés d'une pédagogie de la découverte dans l'enseignement des sciences" in *Aster n°5. Didactique et histoire des sciences*, 1987.

d'illustrer un cheminement intellectuel de type scientifique et expérimental, et de voir un mode opératoire. Pour cela il faut contextualiser l'expérience, lui rendre son histoire. Il faudrait énoncer une problématique et montrer comment le protocole expérimental a été construit, en fonction de cette problématique. Il faudrait ensuite décrire comment



Cheminement de la transposition didactique

l'expérience est conduite matériellement. Vouloir tout dire ou vouloir faire dire à une expérience, plus que le questionnement dont elle est issue, aboutit malheureusement à l'incohérence que nous avons soulignée et ne peut entraîner chez l'élève (tout au moins chez celui qui se pose des questions, et qui n'apprend pas seulement pour passer l'examen) une impression d'inintelligibilité.

Si nous avons mené une étude approfondie de l'expérience utilisant le bleu de méthylène, c'est parce qu'elle est la seule expérimentation proposée par le manuel, concernant les mécanismes cachés de la respiration cellulaire. D'autres expériences sont bien évidemment présentées dans ce manuel et dans celui de Première D, mais elles portent uniquement sur la mise en évidence d'échanges gazeux respiratoires. L'approche expérimentale y est concrétisée par la présentation d'un ensemble de dispositifs destinés à constater que la respiration s'accompagne d'absorption d'oxygène et de rejet de CO₂.

Dans tous les cas il s'agit - comme le soulignaient déjà en 1978 les auteurs de *"Quelle éducation scientifique pour quelle société ?"*(22) - d'illustrations-démonstrations qui ne restituent pas la démarche expérimentale dans ses étapes caractéristiques, c'est-à-dire un protocole expérimental élaboré dans le cadre d'un questionnement : *"une expérience scientifique à la différence d'une rencontre commune, est préparée, imaginaire avant d'être réelle ; la mise en rapport des concepts et des objets est d'abord préalable à l'expérience réelle"*(23).

les étapes
caractéristiques
de la démarche
expérimentale
ne sont pas
restituées

- Présentation d'un bilan de la respiration cellulaire,
ou "de l'effet de la compaction extrême des savoirs"

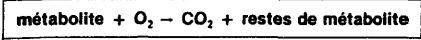
Avant de quitter ce paragraphe du manuel, nous voudrions revenir sur la représentation synthétique faisant le *"Bilan de la respiration cellulaire"*.

(22) ASTOLFI J.P., et al., *Quelle éducation scientifique pour quelle société ?* Paris, P.U.F., 1978.

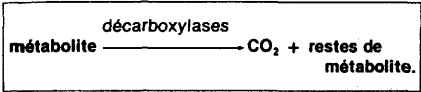
(23) RAYMOND P., *Le passage au matérialisme*. Paris, Maspéro, 1973.

C. L'origine du dioxyde de carbone

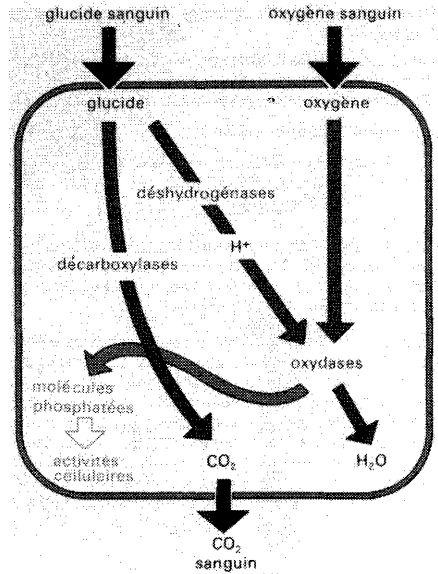
L'oxygène, nous venons de le voir, intervient dans la formation de l'eau; il ne peut pas se retrouver en même temps dans le dioxyde de carbone selon l'équation :



Sous l'action d'enzymes, les **décarboxylases**, les métabolites perdent des groupements CO₂ directement éliminés sous forme gazeuse.



L'utilisation de nutriments à carbone marqué, (radioactif), permet de confirmer ce fait, le carbone marqué se retrouve dans le CO₂ éliminé alors que le marquage de l'oxygène absorbé montre qu'il se retrouve dans l'eau.



Biologie, Terminale C, Collection J. Escalier, F. Nathan 1980, p. 179.

Ce schéma prête à de nombreuses critiques : le cadre représente vraisemblablement la cellule et les phénomènes respiratoires n'y sont absolument pas compartimentés.

Sur le schéma déshydrogénations et décarboxylations empruntent des voies totalement séparées, alors qu'il s'agit toujours de décarboxylations oxydatives, c'est-à-dire d'une décarboxylation associée étroitement à une déshydrogénation et ceci au sein d'un même complexe enzymatique.

Comme dans le texte les déshydrogénases semblent transférer des H⁺(point que nous avons déjà largement discuté). La condensation extrême de la présentation des mécanismes entraîne encore une fois des représentations erronées. En fait, le schéma est certainement construit pour rendre compte des échanges gazeux cellulaires, qui étalent le cadre de référence de l'expérience proposée. La volonté de cette démonstration gauchit totalement l'expression simplifiée des mécanismes de la respiration cellulaire. La description ultérieure plus détaillée de la respiration cellulaire devra substituer à ce schéma une représentation radicalement différente, et ne pourra en aucune manière s'appuyer sur cette première représentation simplifiée, pour restituer à la fois les étapes et la localisation précise des phénomènes de la respiration cellulaire (glycolyse, cycle de Krebs, oxydations terminales).

représentation erronée par condensation extrême de la schématisation

Pour résumer, les auteurs des manuels (publiés avant la réforme Haby) que nous avons analysés, donnent une place prépondérante aux descriptions anciennes au niveau des structures I et II décrites par F. Jacob, datant en gros du XIX^{ème} siècle, et lorsqu'ils abordent la respiration cellulaire, ils se limitent à des descriptions évitant la formulation propre à la biochimie.

cent ans de
savoir à rattraper

Les élèves sortant des études secondaires en 1981 avaient une représentation de la respiration centrée essentiellement sur les échanges gazeux, pas très éloignée du "sens commun actuel" et à peu près cent ans de connaissances à rattraper pour aborder des concepts contemporains, ils étaient dépourvus des savoirs essentiels se rapportant aux phénomènes cellulaires, sans compter qu'ils avaient quelques notions confuses ou fausses à éliminer.

4. PRÉSENTATION DE LA RESPIRATION DANS LES MANUELS APRÈS LA RÉFORME HABY

Nous avons cherché à savoir par l'examen des nouveaux ouvrages destinés aux classes scientifiques si l'application de la réforme "Haby" amenait de nouvelles perspectives dans la transposition didactique du concept de respiration et plus spécifiquement quant à l'actualité du contenu et à la présentation de la démarche scientifique.

La respiration est alors enseignée en Première S (rentrée 1982) et en Terminales C et D (rentrée 1983). Ce sujet s'inscrit donc dans un contexte différent puisqu'il est abordé sur deux années successives : Première S puis Terminale D, ou Première S puis Terminale C.

la respiration
dans une
nouvelle
perspective

Au niveau de la Première S, la respiration s'insère dans une perspective nouvelle. En Première D elle était rattachée à "quelques problèmes d'alimentation et de nutrition". Dans les programmes de Première S, elle est traitée dans la perspective plus générale "des transformations de la matière chez les êtres vivants - Production et consommation".

Il faut voir là une modernisation : en effet la cellule vivante est maintenant définie et étudiée du point de vue des transferts de matière, d'énergie et d'information dont elle est le siège. Respiration/Fermentation/Libération d'énergie font un tout explicite dans le nouveau programme, ce qui n'était pas le cas dans l'ancien. Si l'on se reporte aux contenus détaillés des programmes, on trouve plusieurs recommandations très importantes :

"des connaissances biochimiques plus détaillées (glucides, lipides, protides) sont acquises au fur et à mesure qu'elles sont ressenties comme des outils indispensables pour le naturaliste. L'étude de la photosynthèse et de la respiration sera faite à l'échelle de l'organisme, des tissus, de la cellule (organites, chaînes réactionnelles, phosphorylations et rôle de

l'ATP relevant de la classe de Terminale). Un bilan final relatif à l'énergie libérée sera fait en liaison avec la physique"(24).

Comment se traduisent ces nouvelles perspectives dans les manuels ?

4.1. La respiration dans un manuel de Première S après réforme

L'examen du livre de Première S (25) montre que les auteurs ont transféré tel quel le contenu du livre de Terminale C avant réforme (1980) !...Ils y ont seulement inséré l'étude de deux fermentations conformément au programme.

Tous les commentaires sur le caractère vague, peu compréhensible voire faux (confusion constante entre proton et hydrogène) de l'exposé du manuel de Première D s'appliquent ici puisqu'il s'agit du même texte et des mêmes expériences !

Nous retrouvons l'importance considérable réservée aux échanges gazeux et à leur mesure, et si nous regardons le court paragraphe (nouveau) consacré aux phénomènes chimiques de la fermentation, l'exposé est si vague qu'il est à nouveau incompréhensible, voire faux. Encore une fois, comment comparer la respiration et la fermentation au niveau de leurs mécanismes et de leur cohérence sans utiliser la chimie ? Cet exposé est sans utilité pour ces élèves car il faudrait connaître la biochimie des phénomènes décrits pour comprendre vraiment le sens du texte ou des schémas résumant en un tableau comparatif : respiration, fermentation lactique - fermentation alcoolique.

4.2. La respiration dans un manuel de Terminale C après réforme

Dans les programmes de Terminale C et de Terminale D (après réforme Haby), seule l'étude de la respiration cellulaire est proposée, insérée dans un chapitre de biologie cellulaire consacré à "*Matière et Energie*", sous la forme : "*L'ATP : production, utilisation*" en Terminale C ou "*Phénomènes énergétiques - Photosynthèse, Respiration, Fermentation*" en Terminale D. Les deux manuels de Terminale C(26) et de Terminale D(27) présentent à peu près le même contenu, mêmes documents, mêmes illustrations, etc. disposés différemment.

Nous examinerons successivement trois aspects de la transposition didactique : l'actualisation du savoir, la contextualisation historique et la présentation de la démarche expérimentale.

(24) Ministère de l'Education Nationale, *Sciences Naturelles*, classes de Seconde, Première et Terminale, Collection horaires, objectifs, programmes, instructions, C.N.D.P., 1982.

(25) *Biologie-Géologie 1ère S*, Collection Escalier - Nathan, 1982.

(26) *Biologie Terminale C*, Collection Escalier - Nathan, 1983.

(27) *Biologie Terminale D*, Collection Escalier - Nathan, 1983.

transposition de
l'ex-Terminale C
en Première S !

• Actualisation du savoir

transformations
et transfert
d'énergie
et respiration

production d'ATP

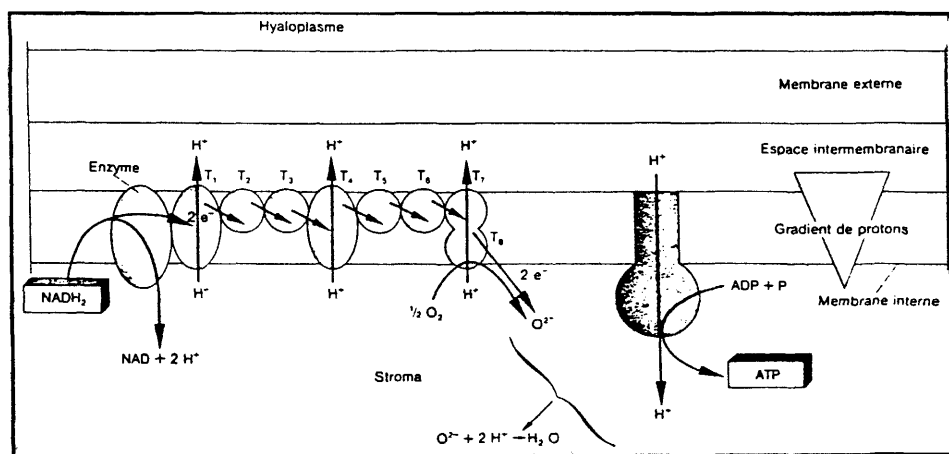
la théorie de
Mitchell

La perspective d'étude de la respiration est d'emblée intégrée dans le cadre plus large des mécanismes de transformations et de transferts d'énergie conduisant dans la cellule vivante à la formation d'ATP. Les phénomènes étant étudiés au niveau intracellulaire, on aborde là les mécanismes moléculaires et la relation fondamentale structure/fonction, c'est-à-dire le savoir contemporain. La présentation est faite suivant un thème : "ATP, production, utilisation" réunissant des phénomènes (photosynthèse et respiration, fermentation) qui deviennent comparables et explicitement cohérents au niveau des mécanismes moléculaires. Mais ceux-ci sont décrits sans utiliser la conceptualisation de la biochimie : formules développées, réactions chimiques, concepts de systèmes couplés d'oxydo-réduction, notions de déshydrogénases et de cofacteurs, transporteurs d'équivalents réducteurs, etc...et on aboutit à une présentation des mécanismes moléculaires purement discursive, imprécise et pouvant sur certains points fondamentaux encore prêter à confusion.

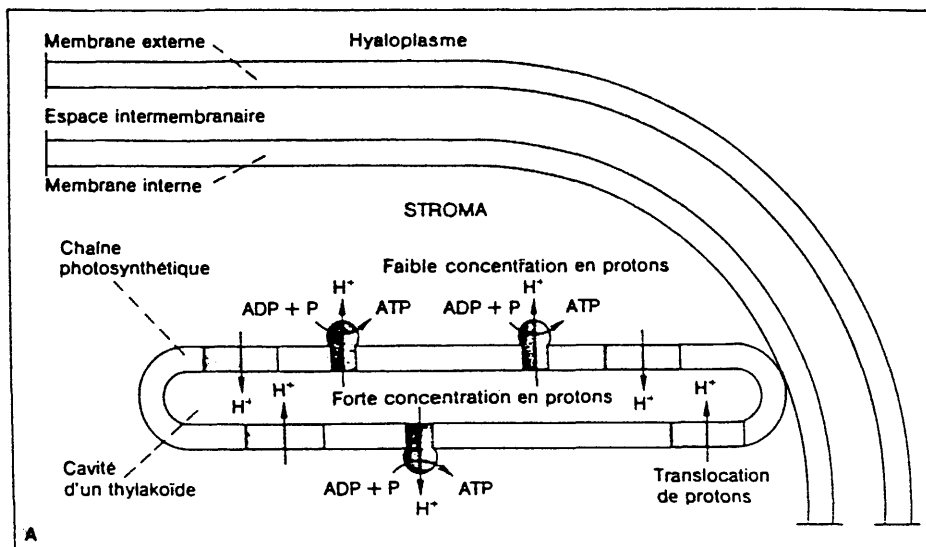
L'énoncé d'une des dernières théories explicatives des mécanismes transducteurs de l'énergie (mécanismes opérant dans la photosynthèse et dans la respiration) - théorie de Mitchell - est exposé à l'aide de trois schémas et quelques lignes de texte explicatif, donc d'une façon extrêmement résumée sans aucune allusion, ni au contexte théorique, ni aux expérimentations qui ont permis l'épanouissement du paradigme actuel de la communauté scientifique concernant les mécanismes de la respiration cellulaire.

13. Relation entre l'organisation membranaire de la mitochondrie et son fonctionnement : la phosphorylation oxydative (le mécanisme est le même lors de l'oxydation d'une molécule de FADH_2).

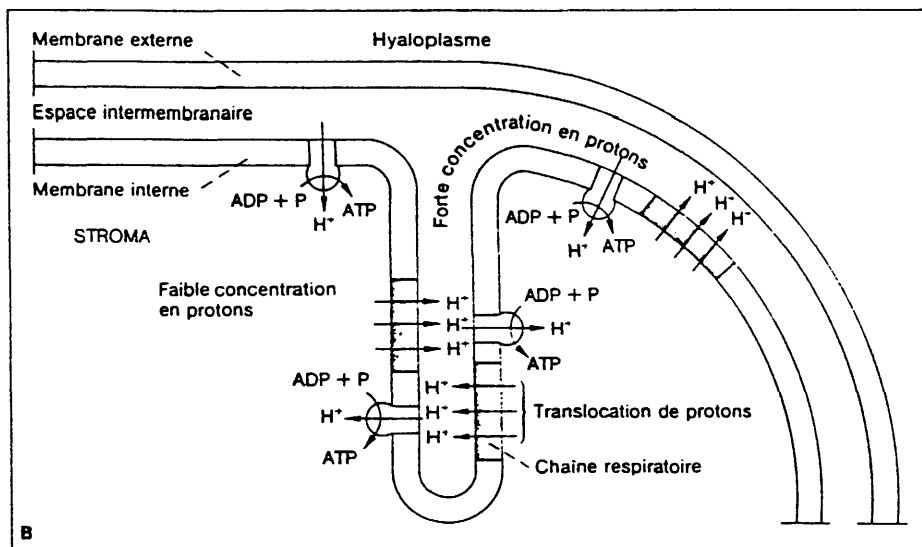
T_1 - T_8 : Transporteurs d'électrons



Biologie Terminale C, Collection J. Escalier, F. Nathan (1983), p. 277.



A



B

2. Mécanisme de la phosphorylation.

A. Dans les chloroplastes ;

B. Dans les mitochondries.

Dans les deux cas il est lié au compartimentage de l'organelle ce qui permet l'établissement d'un gradient de protons engendré par un transport intramembranaire

d'électrons à l'origine d'une translocation de protons. L'identité fonctionnelle apparaît encore plus grande si l'on considère que les thylakoïdes dérivent de replis de la membrane interne comme les crêtes mitochondriales.

Ces deux schémas permettent de comparer les mécanismes responsables de la formation d'ATP dans le chloroplaste et dans la mitochondrie. Ils sont présentés dans le chapitre *Autotrophie/Hétérotrophie* au niveau cellulaire.

savoir actualisé
en trois schémas

Ce qu'il faut bien souligner c'est que ces schémas, apparemment très clairs, résumant les étapes de la respiration cellulaire, ne peuvent à notre sens être vraiment assimilés donc utiles(28), qu'après une étude plus détaillée. Ces pages apparaissent plus comme un "aide mémoire" du baccalauréat que comme un exposé organisé pour que l'élève acquière un savoir intégré. Ceci est en partie dû au fait que les concepts essentiels et nécessaires qui sous-tendent l'établissement de ces schémas n'ont pas été préalablement définis et travaillés et qu'aucun rapport avec l'expérimentation n'est effectué.

condensation,
simplification
prêtent à
confusion

Nous avons par ailleurs noté que des concepts essentiels sont présentés de façon si condensée, que l'on aboutit à une simplification effaçant la complexité et prêtant finalement à confusion, en voici deux exemples :

"...l'ATP qui est le vecteur usuel de l'énergie dans la cellule. "Déchargé" de son énergie par hydrolyse, il permet les différentes activités cellulaires".

"La plupart des molécules à liaisons riches en énergie correspondent à des dérivés phosphorylés".

hydrolyse de l'ATP
à approfondir

Reprenons le concept de l'hydrolyse de l'ATP, en effet, si l'énergie libre d'hydrolyse est un moyen permettant de classer différentes molécules d'un point de vue énergétique, la réaction d'hydrolyse elle-même ne fournit en aucun cas une énergie utilisable dans les conditions cellulaires. Si l'on considère l'hydrolyse de l'ATP, l'énergie libre est tout simplement perdue sous forme d'un dégagement de chaleur. En fait l'utilisation de l'énergie libre en biochimie passe par le transfert de groupes activés - Phosphoryl - dans le cas de l'ATP. Il se forme des composés intermédiaires phosphorylés au cours de réactions couplées. Le rôle énergétique réel de l'ATP repose sur le fait qu'il participe de manière stœchiométrique à ces réactions ; le rôle du catabolisme étant de maintenir constamment le rapport de concentration ATP/ADP loin de l'équilibre thermodynamique.

validité de la
notion de liaison
riche en
énergie ?

De même la notion de liaison riche en énergie n'est pas adéquate, une liaison ne fournit pas d'énergie puisqu'il faut en fournir pour la rompre - les composés phosphorylés ne faisant pas exception. On voit ici que l'évocation de l'hydrolyse de l'ATP autant que la notion de liaison "riche en énergie"

(28) Nous nous appuyons ici, sur une autre partie de cette recherche où nous avons testé à l'aide d'un questionnaire, entre autres, la compréhension des connaissances résumées par ces deux schémas. Il s'avère que seulement 1/10 des étudiants arrivent à dégager l'identité des mécanismes de la phosphorylation au niveau membranaire, dans la photosynthèse et la respiration. D'autre part la notion fondamentale de compartimentation liée à ces deux schémas est totalement scotomisée.

telles qu'elles sont proposées dans le manuel, sans plus d'explications, ne peuvent que conduire à des conceptualisations trompeuses.

le savoir est
actualisé mais...

L'analyse des manuels des sections scientifiques avant réforme nous avait montré un décalage important entre leur contenu et l'actualité scientifique. Ce décalage a disparu dans les manuels étudiés au niveau des Terminales C et D après réforme. Des concepts contemporains ont-ils été véritablement transmis à l'élève ? Les commentaires du programme indiquent que celui-ci "...rejette tout parti pris encyclopédique...Les choix des thèmes d'étude sont dictés par le souci de familiariser les élèves avec les acquisitions récentes de la connaissance biologique et notamment dans les disciplines les plus performantes"(29).

Or les acquisitions récentes de la biologie qui se sont opérées au niveau moléculaire s'expriment presque toutes en termes de biochimie. L'intention du programme ne peut donc aboutir que partiellement puisqu'aucun enseignement élémentaire de biochimie n'est envisagé pour accompagner l'actualisation.

• Dimension historique du savoir

S'il y a bien actualisation du savoir, dans les conditions qui viennent d'être évoquées, on peut cependant s'interroger sur les modalités d'introduction de cette actualisation, laisse-t-elle la place à une dimension historique ?

Avant la réforme Haby, l'actualisation du savoir nous l'avons vu s'arrêtait à la fin du XIX^{ème} siècle, la référence à la dimension historique se résumait :

avant la réforme
on cite Lavoisier
et Warburg...

- soit à l'introduction d'un mémoire de Lavoisier présenté à l'Académie de Médecine en 1785, signé et daté, dans le cadre de la partie documentation qui accompagne le chapitre (Escalier) ;
- soit à une note de bas de page mentionnant "Paul Bert, physiologiste français (1833-1886) et Otto Warburg, biochimiste allemand, né en 1883, prix Nobel en 1931 pour ses travaux sur les oxydations cellulaires"(Oria).

après on leur
ajoute Pasteur,
Spallanzani...

Après la réforme Haby, le même texte de Lavoisier est repris dans le manuel de Première S (Escalier), dans la partie documentation, ainsi qu'un extrait de la revue "Pour la Science" portant sur Pasteur, père de la microbiologie (A.Demain et N.Salomon). Dans le texte même, figure la méthode de Warburg, et le nom de Spallanzani à qui est attribué en 1804 une expérience de mise en évidence de la respiration cellulaire. Dans les manuels de Terminales D et C alors que le savoir présenté va jusqu'aux recherches contemporaines, seuls, en Terminale D, les noms de Spallanzani (1804) et Warburg (sous le vocable de "Méthode de Warburg") sont cités à propos de la démonstration de l'existence d'une respiration cellulaire.

(29) Voir (24).

et Krebs associé
à son cycle

Krebs est cité, associé au cycle qui porte son nom, il est précisé qu'il en est le "découvreur", un astérisque renvoie à un index situé à la fin de l'ouvrage : *"Krebs Hans Adolf (1900-1981), Biochimiste allemand auteur de travaux sur le métabolisme cellulaire. Prix Nobel de physiologie et médecine en 1953"*.

en Terminale pas
d'auteur cité

Dans le livre de Terminale C, figure un paragraphe entier intitulé *"Historique des recherches sur l'énergétique cellulaire"*. Cet historique, ponctué de cinq dates allant de 1887 à 1939, rappelle quelques étapes de la compréhension de l'énergétique de la contraction musculaire, sans qu'aucun auteur ne soit cité. L'exposé développe l'idée d'une succession de découvertes qui s'articulent les unes par rapport aux autres et qui font finalement ressortir le rôle fondamental de l'ATP dans la contraction musculaire.

A l'actualisation du savoir, que nous avons vu s'accomplir dans les manuels étudiés, ne correspond aucune construction historique des savoirs sur la respiration. La dimension historique se résume à l'évocation de deux noms attachés pour l'un à une méthode de mesure - méthode de Warburg - pour l'autre à un cycle biochimique - le cycle de Krebs.

• Présentation de la démarche expérimentale

Dans les commentaires des instructions officielles il est également souhaité que : *"Pour ce qui concerne le domaine de la formation intellectuelle, l'enseignement des sciences biologiques ambitionne de parfaire l'apprentissage de l'attitude scientifique. Pour cela, cet enseignement se propose de montrer l'efficacité de la démarche expérimentale..."*.

le dialogue
expérimental
pratiqué par le
science
moderne...

Nous partirons de cette intention pour nous interroger sur la place réservée à la démarche expérimentale dans les manuels que nous avons analysés. Le dialogue expérimental tel qu'il est pratiqué par la science moderne se développe tel que l'a défini Prigogine (30). *"L'expérimentation ne suppose pas la seule observation fidèle des faits tels qu'ils se présentent, ni la seule quête de connexions empiriques entre phénomènes. L'expérimentation exige une interaction entre théorie et manipulation pratique, qui implique une véritable stratégie. Un processus naturel se trouve arraisonné comme clef possible d'une hypothèse théorique ; et c'est en tant que tel qu'il est alors préparé, purifié, avant d'être interrogé dans le langage de cette théorie. C'est là une entreprise systématique qui revient à provoquer la nature, à lui faire dire de manière non ambiguë si elle obéit ou non à une théorie"*.

Aucun des manuels étudiés ne présente l'expérimentation sous cette forme. Toutes les "expériences" proposées sont de simples démonstrations montrant un dispositif expérimental, précisant des conditions opératoires de mise en oeuvre

(30) PRIGOGINE I , STENGERS T., *La nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard, 1979.

n'apparaît pas
dans les manuels

ou de collecte de mesures, donnant des résultats à l'élève-spectateur. A aucun moment on ne propose de réfléchir sur le cadre théorique de l'expérience ou sur les questions qui la suscitent et qu'ensuite elle pose. Les expériences sur les échanges gazeux par exemple, pourvu qu'elles soient restituées dans leur cadre conceptuel d'origine (fin XVIIIème) auraient pu permettre de comprendre les modalités de fonctionnement d'une démarche expérimentale. Elles perdent beaucoup de leur intérêt intellectuel lorsqu'elles ne sont plus que de simples démonstrations.

sans contexte
théorique du
questionnement

A propos de savoirs plus récents, nous avons vu que les expériences décrites dans le manuel de Terminale C avant réforme (et donc de Première S après réforme...) à propos de la respiration d'un fragment d'organe en présence de bleu de méthylène, n'avaient plus aucun sens, reconstruites en dehors du contexte théorique de leur questionnement.

juxtaposition des
paradigmes
actuels

Dans les livres de Terminale C ou de Terminale D après réforme, la description des mécanismes de la respiration cellulaire est coupée de toute expérimentation, et de toute référence théorique explicite. Ce mode de textualisation en dehors de toute référence expérimentale aboutit à une accumulation descriptive des paradigmes actuels sans tenir compte des ruptures propres à la constitution des savoirs. On arrive à une simple juxtaposition ; aucun cadre théorique n'est proposé, aucune critique n'est avancée.

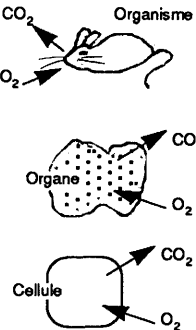
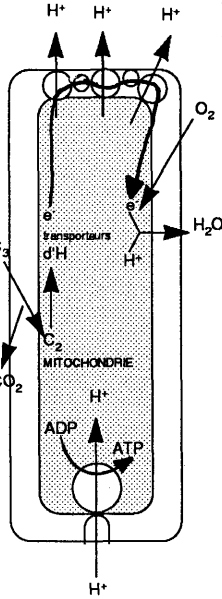
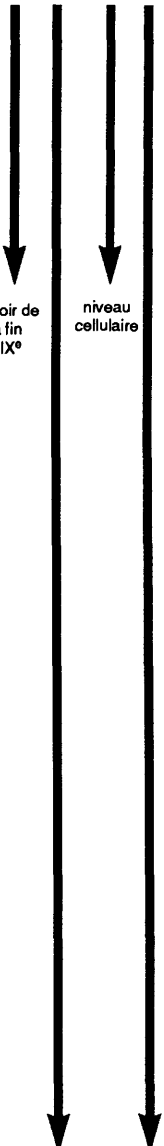
Mitchell pas
cité...

Si l'on examine plus en détail la façon dont la phosphorylation oxydative est présentée dans les manuels de Terminale D et de Terminale C que nous avons étudiés, on constate qu'elle est interprétée dans la cadre de la théorie de Mitchell sans que celle-ci soit formellement présentée ni même nommée. Cette théorie est exposée sous forme d'un schéma représentant un simple mécanisme de transfert d'électrons et de pompage des protons.

sa théorie
qu'effleurée

D'après le schéma (de la page 81) il semble que le pompage des protons est représenté selon les mécanismes proposés par Wikström(31) en 1979. Il s'agit d'une réactualisation scientifique prenant en compte, sous une forme extrêmement condensée et lapidaire, les développements les plus récents de la théorie de Mitchell. Mais le sens profond de la théorie de Mitchell dans ces aspects novateurs, universels, n'est pas mis en lumière ; pourtant ce qui est intéressant dans cette théorie, c'est la rupture conceptuelle qu'elle représente dans l'interprétation de la transduction d'énergie : importance de la compartimentation et de la structure membranaire, dans l'établissement d'une différence de concentration ionique représentant une forme de potentiel énergétique, or, rien de ce qui est réellement "performant" (comme dit le programme) dans cette théorie n'est évoqué ici.

(31) WIKSTRÖM M., KRAB K., "Proton-pumping cytochrome c oxydase" in *Biochemica et Biophysica Acta*, 549, 1979.

SPHÈRE DE LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE			SPHÈRE DIDACTIQUE		
Évolution historique du concept de respiration	Niveau d'exploration du concept respiration	Ruptures épistémologiques	Transposition didactique dans les manuels de l'enseignement secondaire		
			Actualité du savoir	Niveau d'exploration du concept	Démarche expérimentale
			Avant/Après la Réforme HABY (appliquée à partir de 1982)		
<p>XVIII^e Lavoisier Caractérisation des échanges gazeux Respiration = Combustion</p> <p>XIX^e Transfert des gaz par le sang Hémoglobine Quotient respiratoire</p> <p>Fin XIX^e Mitochondries du muscle Études métaboliques Cytochromes</p> <p>XX^e 1910-20 Batteli et Stern Déshydrogénases Enzymes respiratoires Glycolyse Fermentations Rôle Red/ox des cytochromes</p> <p>1937 Krebs rôle des acides tricarboxyliques</p> <p>1939 Rôle de l'ATP</p> <p>1948 Lehninger Oxydations terminales</p> <p>1951 Rôles des oxydations terminales</p> <p>1961 Mitchell Théorie chimio-osmotique</p> <p>1968 Racker - Isolement de particules submitochondriales</p> <p>1980 Wikström - Remaniements et approfondissement de la théorie chimio-osmotique</p>	  <p>Localisation ultrastructurale et mécanismes moléculaires</p>	<p>RESPIRATION = COMBUSTION</p> <p>RESPIRATION ≠ COMBUSTION</p> <p>ENZYMES de COUPLAGE INTERMÉDIAIRES ACTIVÉS</p> <p>THÉORIE CHIMIO-OSMOTIQUE</p>	 <p>Savoir de la fin XIX^e</p> <p>niveau cellulaire</p> <p>savoir actuel sans utiliser la biochimie</p> <p>niveau moléculaire</p>	<p>Construction d'expériences "ad hoc" de type pédagogique</p> <ul style="list-style-type: none"> - Démarche inductiviste - Décontextualisation du savoir - Déproblématisation - Absence de rupture épistémologique <ul style="list-style-type: none"> - Absence totale d'expérimentation - Absence d'hypothèses et de preuves expérimentales - Décontextualisation - Déproblématisation - Absence de rupture épistémologique 	

5. POUR CONCLURE, LES MANUELS UN MODE DE TEXTUALISATION SCOLAIRE DU SAVOIR SAVANT

Plusieurs conclusions majeures ressortent de l'étude de ces manuels. Reprenons-les, suivant les deux grands axes de la transposition didactique que nous avons privilégiés : l'actualisation des savoirs et la présentation de la démarche scientifique. Avant la réforme Haby, les contenus des manuels avaient un décalage d'une centaine d'années par rapport à l'actualité scientifique. L'accent était porté sur les échanges gazeux respiratoires, et les notions relatives à la respiration cellulaire n'étaient données que pour justifier ceux-ci.

L'application de la réforme s'est traduite par une actualisation du savoir, jusqu'au niveau ultrastructural. L'étude est alors placée dans la perspective contemporaine des flux énergétiques. Tandis que l'essentiel des savoirs acquis dans la sphère savante à propos de la respiration au cours du XX^{ème} siècle, est fondé sur la biochimie, sa conceptualisation en ce qui concerne l'enseignement classique dans la sphère scolaire, n'est quasiment pas utilisée pour décrire les connaissances récentes.

La présentation de la démarche expérimentale se limite à de simples démonstrations, décrivant un dispositif expérimental ou des conditions opératoires de mise en oeuvre ou de collecte de mesures, ces illustrations pratiques ne concernent d'ailleurs que les connaissances se rapportant au niveau de surface.

Pour ce qui est de la présentation des savoirs plus récents, au niveau moléculaire, celle-ci est coupée de toute référence à l'expérimentation.

Expérimentations et savoirs, qu'ils soient passés ou contemporains sont de toute façon décontextualisés et dépersonnalisés.

Ce mode de textualisation des savoirs aboutit d'une part, à une accumulation descriptive des paradigmes, sans qu'il soit tenu aucun compte des ruptures que nous avons observées dans la production du savoir savant, d'autre part, à une condensation simplificatrice et confuse du texte où, chaque mot recouvre une notion, qui demanderait explication pour n'être pas qu'un mot, pour ne pas en rester à "l'illusion d'identifier le sens à celui des mots"(32).

Les connaissances sont effectivement actualisées dans les manuels, mais leur décontextualisation tant théorique qu'expérimentale produit un savoir fini, assorti d'une abréviation considérable de l'exposé qui comme le souligne Lehninger "ne facilite jamais la compréhension initiale"(33). Le doute scientifique est évacué, et on assiste à

(32) LEVY LEBLOND J.M., *L'Esprit de sel*, Paris, Fayard, 1981.

(33) LEHNINGER A., *Principles of Biochemistry*, N.Y. Worth, 1982.

éviction de
la biochimie,
une querelle
d'école ?

une présentation figée de la science. L'intelligibilité du concept actualisé s'évanouit totalement. Avec ce mode de transposition, apparaît donc dans la sphère scolaire *"un savoir exilé de ses origines, et coupé de sa production historique dans la sphère du savoir savant, se limitant en tant que savoir enseigné de n'être d'aucun temps ni d'aucun lieu"*(34).

Le paradoxe que constitue l'éviction de la discipline fondamentale de référence, dans la présentation d'un savoir, nous a amenées à nous poser les questions suivantes : la biochimie n'est-elle pas utilisée parce que les enseignants rédacteurs de manuels ne l'on pas étudiée ? ou bien s'agit-il de la manifestation de "points de vue d'école" ?

Le problème ne se pose pas en fait en termes de savoirs ignorés, mais bien en termes de choix délibéré d'une des perspectives de la biologie. A l'université, on peut assister à partir de 1957, à l'introduction de la biochimie dans l'ensemble des cursus universitaires, elle se diffuse ensuite progressivement dans les programmes des classes préparatoires, ces cursus étant constitutifs des programmes des concours de recrutement des enseignants (CAPES et Agrégation) la biochimie est ici introduite au moins formellement.

La reconstruction des curricula que nous avons menée par ailleurs(35) fait nettement apparaître que l'objet de savoir que nous avons étudié, pour devenir objet enseigné passe par un véritable travail de transformation et de définition au sein de la sphère de la planification didactique. L'objet à enseigner est ainsi perçu et désigné à partir d'une perspective naturaliste.

Alors qu'à l'université, de par la proximité avec la recherche, une approche contemporaine de la respiration cellulaire a été introduite et régulièrement actualisée, le poids des sciences descriptives au niveau des concours de CAPES et d'Agrégation est resté prépondérant, la plupart des sujets posés concernant la respiration en témoignent par leur caractère naturaliste.

Une présentation "naturaliste" du savoir se justifie tout à fait à condition d'être explicite et cohérente avec les buts que l'on se fixe. La connaissance descriptive du monde vivant, des notions générales d'anatomie, de physiologie descriptive sont certainement indispensables pour ordonner des savoirs ultérieurs de nature fonctionnelle. En fait un aller-retour continu entre ces différents niveaux de savoir devrait s'effectuer pour que les acquis de détail ne masquent pas finalement le fonctionnement plus global. Mais si l'on choisit l'approche descriptive et naturaliste, on se trouve alors de fait, en dehors du champ d'interprétation de la respiration cellulaire et on ne peut plus prétendre actualiser totalement ce savoir. Pour notre part nous pensons que

(34) CHEVALLARD Y., op.cit. (1).

(35) Voir (5).

l'acquisition d'un outil intellectuel tel que la démarche scientifique dans sa dimension expérimentale, ancrée dans un savoir précis, est tout au moins aussi importante que d'actualiser le savoir jusqu'au dernier paradigme en cours dans la recherche.

De toute façon, l'actualisation ne devrait pas consister à accoler simplement de nouveaux savoirs aux anciens, mais devrait opérer une refonte et remettre l'ensemble des savoirs en perspective, évitant ainsi de "lire" les nouveaux faits avec les grilles anciennes de lecture. Ainsi *"les manuels...sont à réécrire, en totalité ou en partie, chaque fois que le langage, la structure des problèmes ou les normes de solution des problèmes de la science normale changent; bref à la suite de chaque révolution scientifique"*(36).

Michèle GROSBOIS
Laboratoire de Physiologie cellulaire
et moléculaire
Université P. et M.Curie
CNRS - UA 1180

Graciela RICCO
U.F.R. de Sciences de L'Education
Laboratoire de Psychologie du
développement et de l'Education
Université R.Descartes
CNRS - G.R.-Didactique

Régine SIROTA
Équipe de Sociologie de l'Education
U.F.R.de Sciences de l'Education
Université R.Descartes
CNRS URA 887

BIBLIOGRAPHIE

ASTOLFI J.P. et al., *Quelle éducation scientifique pour quelle société ?*, Paris, P.U.F., 1978.

BACHELARD G., *La formation de l'esprit scientifique*, Paris, J.Vrin, 1983.

BOURGEOIS C., "Utilisation du bleu de méthylène pour mettre en évidence les déshydrogénases respiratoires" in *Bulletin A.P.B.G.*, 1966.

CANGUILHEM G., *Etudes d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris, J.Vrin, 1983.

CHEVALLARD Y., *La transposition didactique, du savoir savant au savoir enseigné*, Grenoble, Ed. La Pensée Sauvage, 1985.

(36) KUHN T.S., *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1972.

DEBRU C., *L'esprit des Protéines - Histoire et Philosophie Biochimiques*, Paris, Hermann, 1983.

FORQUIN J.C., *Ecole et Culture*, Bruxelles, De Bœck, 1989.

GIORDAN A., *Histoire de la Biologie*, Tome I - Technique et Documentation - Paris, Lavoisier, 1987.

GROSBOIS M., RICCO G., SIROTA R., *Le parcours du savoir dans la chaîne de transposition didactique. A propos de la respiration*. Rapport de recherche. Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, mars 1988.

ISAMBERT-JAMATI V., *Les savoirs scolaires*, Paris, Editions Universitaires, 1990.

JACOB F., *La logique du vivant, une histoire de l'hérédité*, Paris, Gallimard, 1970.

KUHN T.S., *La structure des révolutions scientifiques*, Paris, Flammarion, 1972.

LEHNINGER A., *Principles of Biochemistry*, N.Y., Worth, 1982.

LEVY-LEBLOND J.M., *L'esprit de sel*, Paris, Fayard, 1981.

MITCHELL P., "Coupling of phosphorylation to electron and hydrogen transfer by a chemiosmotic type of mechanism" in *Nature*, 191 : 144-148, 1961.

PRIGOGINE I., STENGERS I., *La nouvelle Alliance*, Paris, Gallimard, 1979.

RAYMOND P., *Le passage au matérialisme*, Paris, F.Maspéro, 1973.

SOURCES

Manuels du secondaire :

- *Géologie-Biologie, Première D*, cours ORIA, Hatier, 1980.
- *Biologie, Terminale C*, Collection Escalier, F. Nathan, 1980.
- *Biologie-géologie, 1ère S*, Collection Escalier, F. Nathan, 1982.
- *Biologie, Terminale C*, Collection Escalier, F. Nathan, 1983.
- *Biologie, Terminale D*, Collection Escalier, F. Nathan, 1983.