



FONDATION  
LETTRES & SCIENCES

ÉCOLE PROFESSORALE DE PARIS

*Séminaire*

*« Quel enseignement secondaire pour le XXI<sup>e</sup> siècle ? »*

***L'ENSEIGNEMENT DES  
SCIENCES DE LA VIE ET  
DE LA TERRE***

**par Yves BARRAL**

## SOMMAIRE

I – Qu’est-ce que la biologie, et de quels pièges doit-on se garder quand on l’enseigne ? .....	6
L’enseignement de la biologie : les pièges à éviter .....	9
La diversité du vivant. L’importance méconnue des organismes unicellulaires.....	13
 II – Les grandes lignes d’un programme pour le collège et le lycée .....	 17
6 <sup>ème</sup> et 5 <sup>ème</sup> .....	17
4 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> .....	18
2 <sup>de</sup> .....	20
1 <sup>ère</sup> .....	21
Terminale .....	21
 III - Le programme détaillé .....	 22
6 <sup>ème</sup> et 5 <sup>ème</sup> .....	22
4 <sup>ème</sup> et 3 <sup>ème</sup> .....	25
2 <sup>de</sup> .....	27
1 <sup>ère</sup> .....	29
Terminale .....	30

## L'ENSEIGNEMENT DES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

par Yves Barral<sup>1</sup>

Merci de m'avoir invité à ce Séminaire sur l'avenir de l'enseignement secondaire. J'ai d'abord hésité à relever le défi, pour plusieurs raisons. La première est que la biologie est une science qui bouge très vite ; donc enseigner la biologie, à l'heure actuelle, c'est viser une cible mouvante. Une autre raison est que l'enseignement de la biologie a un fort potentiel de conflits. La biologie touche à des choses qui suscitent les passions, que ce soit l'eugénisme, le racisme, le genre, la reproduction... Ces notions sont souvent dénaturées, en tout cas controversées. Même la théorie de l'évolution est encore remise en doute et discutée ; c'est un sujet explosif. D'autant que la biologie est souvent instrumentalisée. Le biologisme peut être une façon de répondre à beaucoup de questions, même sur des sujets où elle n'apporte nullement de réponses. S'en mêler n'est donc pas de tout repos.

En outre, je n'avais pas eu jusqu'à présent l'occasion de réfléchir à la manière d'enseigner la biologie à l'école, au collège ou au lycée. Je suis responsable du *curriculum* de biologie à l'École Polytechnique de Zürich. Je crois donc savoir à peu près comment enseigner la biologie à des étudiants qui veulent faire de la recherche. Mais ce n'est pas la même chose de l'enseigner à des enfants et adolescents qui, au départ, n'ont aucune raison d'être passionnés.

J'ajoute une dernière raison qui, en fait, nous ramène à la première. C'est que je pense que la biologie a été largement sous-estimée pendant longtemps, puisqu'elle n'était que le troisième niveau du vieux triptyque « Mathématiques – Physique-chimie – Biologie », qui suggère qu'il y a une hiérarchie entre ces sciences. Or je ne crois absolument pas à cette hiérarchisation, laquelle produit des effets

---

<sup>1</sup> Professeur de Biochimie Cellulaire et directeur du curriculum de Biologie à l'École Polytechnique fédérale de Zürich.

pervers d'abord dans l'enseignement même. Je me souviens que, quand j'étais lycéen, je voulais déjà faire de la biologie. Mais, à l'époque, cela impliquait d'aller aller en Terminale D. Or, sachant que cette terminale avait mauvaise réputation, j'ai finalement choisi de faire C. Le fait que, même pour faire de la biologie, il faille se consacrer presque entièrement d'abord aux mathématiques, n'est pas forcément une mauvaise chose. Je ne regrette nullement d'avoir fait des maths. Mais je pense que tous ceux qui ont fait des mathématiques parce qu'ils ne voulaient surtout pas entendre parler de biologie, ont perdu une occasion de penser à un domaine remarquable de la connaissance et de se familiariser avec une science essentielle à notre compréhension du monde et de sa complexité.

Malgré ces difficultés, je me suis dit que je pouvais avoir quelques idées sur l'enseignement de la biologie aux plus jeunes. En effet, j'ai déjà l'expérience de mes enfants. J'ai un fils qui a commencé sa scolarité en Allemagne, l'a poursuivie aux États-Unis, et l'a terminée en Suisse dans le système suisse. Je crois qu'à part l'Allemagne, j'ai fait la collection des pires situations qu'on puisse imaginer. De ce point de vue, rassurez-vous, cela ne va pas si mal en France. J'ai un deuxième fils qui, lui, a fait toute sa scolarité au lycée français de Zürich, avec des programmes français, des enseignants franco-suisse, français, suisses, un mélange. Son expérience a été remarquable, et je trouve que l'enseignement des sciences de la vie et de la terre a déjà énormément progressé par rapport à ce qu'on nous offrait.

J'ai aussi la chance d'avoir pu lire des conférences du présent Séminaire qui m'ont été envoyées, notamment celle sur les Mathématiques et celle sur la Philosophie. J'ai trouvé ces textes extrêmement instructifs. Cela m'a aidé à enrichir ma pensée avant de venir ici. Les auteurs soulignent l'importance de la langue. Je fais miennes leurs remarques en ce qui concerne l'enseignement de la biologie.

Dans quelles écoles cet enseignement doit-il avoir lieu ? Je tiens à dire que, pour ma part, je reste partisan de l'école publique, conçue comme une école de liberté, d'égalité et de fraternité. Je pense que les connaissances ne peuvent s'élaborer et se transmettre sans l'égalité de tous devant la connaissance. Pour commencer, aucun enfant ne pourra

ou ne voudra se plier à cet exercice s'il a le sentiment qu'avant même qu'il entame son parcours les dés sont déjà jetés, que ce soit à son avantage ou à son désavantage. Je pense que la fraternité est aussi une dimension essentielle dans tout enseignement à construire, parce que la connaissance est fondamentalement une entreprise collective. Dans les textes du Séminaire que j'ai lus, j'ai vu qu'était mentionnée la « générosité » qu'on doit aux enfants, autre manière de désigner la fraternité dont je parle.

Mais je voudrais surtout mettre en avant la liberté. Je pense que l'école doit être une école de liberté au sens où, en enseignant les savoirs, elle permet aux individus de comprendre les déterminismes auxquels nous sommes sujets, et donc de s'en libérer, puisque comprendre c'est déjà changer son rapport aux choses. Donc l'école se doit d'être une mise à distance, d'être l'occasion de débats et de découvertes. Je parlais de la biologie comme d'un sujet explosif : quand nous allons construire un programme pour cette science, il faudra se demander ce qui exactement doit être mis à distance et comment mettre à distance ces choses sans les dénaturer.

La biologie est la science des relations, puisqu'elle implique de comprendre un écheveau complexe de causalités d'origines diverses. On a beaucoup parlé de la science comme étant une entreprise de désenchantement du monde. Je pense que la biologie nous apporte fondamentalement un éveil à la diversité du vivant, un émerveillement devant la richesse du monde. Elle ouvre à la possibilité d'une multitude de découvertes dont l'élève ne cessera d'être étonné.

Ce qui est essentiel à l'école, c'est qu'on y entende, qu'on y fasse, qu'on y discute des choses qui ne peuvent pas être entendues, faites et discutées ailleurs. Je n'ai réalisé que très tard cette idée, qu'il faut sans doute mettre en avant si l'on veut vraiment re-galvaniser toute la société autour de l'école. L'école est un lieu unique où il se passe quelque chose d'unique. Ma mère, qui est spécialisée dans la psychologie des petits enfants, me disait, quand j'éduquais mes propres enfants : « Les enfants, il ne faut pas se faire de souci s'ils ne vous écoutent pas ; car ce n'est pas parce qu'ils ne vous écoutent pas qu'ils ne vous entendent pas. » Ceci est vrai de l'école. Par exemple, j'ai une grande passion aujourd'hui pour la philosophie, et cette passion, je n'ai pu la cultiver que parce que j'avais entendu à l'école

des choses que je n'avais pas comprises sur le moment, mais que je comprends maintenant et auxquelles j'ai eu envie de retourner.

Mon exposé comportera trois parties. La première cherchera à comprendre ce qu'est la biologie, ce qu'elle nous apporte, et les pièges dont il faut se garder quand on l'enseigne. Puis je présenterai les grandes lignes de ce que pourrait être le programme de biologie. Enfin j'essaierai de faire l'exercice, c'est-à-dire de proposer moi-même un programme détaillé.

## **I – Qu'est-ce que la biologie, et de quels pièges doit-on se garder quand on l'enseigne ?**

Donc, qu'est-ce que la biologie ? Qu'apporte-t-elle en propre ? En quoi n'est-elle pas une simple extension de la physique ou de la chimie ?

D'abord, la biologie a une relation au temps différente de celle de la physique et de la chimie. Un événement biologique n'est pas le même selon qu'il se passe aujourd'hui, il y a 100 000 ans ou dans 100 000 ans. Le contexte dans lequel il se produit change la nature même de l'événement. Ce n'est donc pas comme en physique où un phénomène est le même en quelque temps qu'il se produise. La biologie, elle, est le produit d'une histoire, elle est en elle-même une histoire : l'histoire de la Vie sur cette planète. Ainsi, s'intéresser à l'histoire de la Vie, cela implique de s'intéresser aussi à la vie de la planète, y compris les phénomènes climatiques.

La deuxième spécificité de la biologie, c'est la complexité. Alors qu'en physique ou en mathématiques, on essaie de trouver des régularités, des choses qui sont communes, généralisables, la biologie est le domaine de la diversité, du spécifique, de la spéciation. Même si un grand nombre d'espèces disparaissent aujourd'hui, le mouvement prépondérant de la vie est d'accroître le nombre des espèces. En ce sens, la biologie nous oblige à penser de façon originale les liens entre le particulier et le général. Comme l'a dit Jacques Monod après avoir étudié l'ADN et le code génétique : de la bactérie jusqu'à l'éléphant, ce sont les mêmes éléments de base qu'on retrouve, donc il y a des généralités ; mais ce qui est remarquable, c'est que la bactérie n'est

*pas* un éléphant, et vice versa. Il s'agit de comprendre comment cette généralité et cette diversité se conjuguent.

En physique, on se réfère à la loi des grands nombres. L'événement rare est, précisément, une rareté dont on n'a pas trop besoin de s'occuper. En biologie, au contraire, l'événement rare est souvent celui qui change tout. La majorité des mutations, par exemple, sont néfastes. Donc, si l'on regarde seulement les événements globaux, normaux, tout devrait partir à vau-l'eau, il ne devrait pas y avoir d'évolution. Mais si l'on constate qu'il y a bien un processus positif d'évolution, c'est qu'il existe des mutations positives, qui sont des événements essentiellement rares, mais sur lesquels se construit toute la suite.

La biologie est aussi un domaine de causalités multiples, et c'est cela qui rend cette science si complexe. Si j'ai appris quelque chose en allant à l'IHES<sup>2</sup>, c'est qu'on peut construire une théorie mathématique à partir d'une flèche. Ce n'est pas le cas en biologie où sont en cause des entrelacements de causalités d'origines très différentes. Pour pouvoir prédire la suite d'un événement, il faut d'abord comprendre et connaître la physique et la chimie de cet événement, mais il faut aussi en comprendre ses impacts sur la biologie de la cellule, sur celle de l'organisme, sur celle de l'espèce et enfin sur tout l'écosystème. Une multitude de causalités s'entrelacent les unes avec les autres, et c'est pour cette raison que toute théorie en biologie est partielle. Par exemple, quand on parle de la théorie darwinienne de la sélection, on oublie souvent que, comme l'ont montré un très grand nombre de recherches, il n'existe pas d'écosystèmes au sein desquels les espèces ne collaborent pas entre elles. Les espèces sont *à la fois* en compétition et obligées de collaborer. Ainsi, chaque fois qu'une théorie semble pertinente, on doit s'efforcer de la comprendre en relation avec un entrelacement d'autres causalités qu'il importe de comprendre aussi. La biologie est une science qui ne peut pas se baser sur un absolu mais se construit sur l'étude des liens entre objets, entre composants de la matière vivante, ou entre êtres vivants, donc sur du relatif.

---

<sup>2</sup> Institut des Hautes études scientifiques, où travaille aussi M. Laurent Lafforgue (NDLR).

J'ai un laboratoire de recherche où des étudiants en thèse viennent de la physique, puisque les échanges entre biologie, physique et chimie sont nombreux et féconds. Or, quand un étudiant en physique commence dans mon laboratoire, il veut voir des quantités exactes. Il demande : combien de molécules de ceci ou de cela ? Or, en biologie, on ne connaît pas d'événement dont la mesure exacte ait une véritable importance. Ce qui importe est la mesure relative. C'est une science où les choses ne se comprennent pas dans l'absolu, mais toujours en relation – avec leur contexte, avec les différentes causalités.

Souvent, les gens qui viennent de la physique diront que la biologie est une science de la complexité. Et je pense que ce n'est pas tout à fait exact. La biologie, en somme, ce n'est pas si compliqué. L'espèce humaine partage la même biologie avec quantité d'autres espèces vivant sur cette planète. On peut souvent exprimer cette biologie en termes de problèmes assez simples : ce sont toujours des problèmes d'adaptation, de survie, de nutrition, de reproduction... Certes, la vie adopte volontiers des solutions assez complexes, qui impliquent de la cognition, une capacité d'apprendre, de se souvenir, de communiquer, des processus que l'on retrouve dans toutes les espèces vivantes, même si l'on a cru longtemps qu'elles étaient propres à l'homme. Mais l'idée que la biologie serait complexe vient avant tout du fait qu'on s'est beaucoup focalisé sur la nécessité de faire rentrer la biologie dans la chimie et dans la physique.

Il est clair que toute matière vivante obéit aux lois de la physique et de la chimie. Mais les lois de la biologie ne se résument pas à celle de la physique et de la chimie. Le vivant a ses particularités et ses lois propres. Ainsi, la biologie se distingue des autres sciences d'abord par sa méthode. Elle se base sur l'observation, beaucoup d'observations, de descriptions, afin de permettre des comparaisons. Ce dernier point est capital : comparer est vraiment ce qui fait avancer la biologie, c'est un élément fondamental de sa méthode. Les biologistes vont et viennent en permanence entre le particulier et le général, ils comparent le cas particulier avec le cas général, le cas général avec les cas particuliers, et ceci pour chaque espèce. Montrer les différences qui existent entre les espèces, c'est finalement montrer la façon dont chacune d'elles a dû être inventive au cours de l'évolution pour



résoudre les mêmes problèmes fondamentaux de toute vie, mais chaque fois, précisément, de manière différente. Voilà ce que la biologie apporte de spécifique quant à la méthode, et cela fait d'elle une science qui force l'esprit à penser ensemble de nombreuses choses différentes.

Il faut introduire les élèves dans cet univers. Comment le faire ? Comment enseigner les sciences du Vivant et de la Terre en tenant compte des spécificités que je viens de souligner ?

### *L'enseignement de la biologie : les pièges à éviter*

La première chose que je voudrais mentionner, c'est un certain nombre de pièges dans lesquels il ne faut pas tomber. Le premier est le fonctionnalisme, l'intérêt excessif porté à ce qui est utile. Ici la biologie diffère fondamentalement de la médecine. Pour dire les choses très simplement : le problème du médecin est de résoudre le problème particulier que rencontre un individu particulier, pour qui ce problème est une pathologie. Le biologiste, lui, s'intéresse aux lois de la biologie. Or de ce point de vue, le même phénomène n'est pas forcément pathologique. Il fait simplement partie de la biologie du système. Donc, il va falloir faire très attention à ce que des enfants entrant au collège, qui, spontanément, s'intéressent aux choses utiles et dont ils voient immédiatement la fonction, dépassent ce point de vue étiologique et ne prennent pas la biologie pour une médecine.

En ce moment, par exemple, on voit partout des gens qui essaient d'enseigner comment on peut « soigner » le vieillissement, qui relève à la fois de la biologie et de la médecine. Or, du point de vue du biologiste, le vieillissement est un phénomène très intéressant qui n'est pas *a priori* un problème, mais simplement un fait, d'ailleurs fascinant du point de vue biologique. Donc le biologiste ne souhaite pas qu'on empêche les êtres de vieillir, il soupçonne même que cela pourrait avoir des effets fâcheux. Pour le biologiste, la vieillesse n'est pas une maladie. Au contraire, pour le médecin qui s'intéresse à des gens qui n'ont pas envie de vieillir ni de souffrir du vieillissement, le vieillissement est un problème à résoudre.

Comment éviter de tomber dans le piège de l'utilitarisme ? Je pense que la solution est de s'accrocher bec et ongles à ce concept que

j'ai déjà mis en exergue, la comparaison. Ce qui m'intéresse, ce n'est pas de comprendre comment le corps humain fonctionne, c'est de comprendre comment les corps vivants fonctionnent et peuvent fonctionner de façons très différentes. Il y a des organismes pluricellulaires, d'autres unicellulaires. Il y a une grande richesse de possibilités. Ce qui, dans un cas, est un problème médical, sera vu différemment dans un autre cas et ne sera plus un problème. D'où cette nécessité de mise à distance à laquelle la méthode comparative accoutumera les élèves.

Autre piège. On trouve de tout dans le monde vivant, donc on peut tenter d'expliquer tout et n'importe quoi avec la biologie. En comparant les différentes formes de vie, on va se rendre compte qu'il est inapproprié de vouloir appliquer à différents niveaux une même théorie. Prenons l'exemple de la Trisomie 21. Nombre d'études montrent que de nombreuses cellules du cerveau sont tri- ou multi-somiques. Donc, s'il est exact que la trisomie est un phénomène pathologique dans certain cas, dans d'autre cas ce phénomène fait partie intégrante de la biologie.

Un autre piège que je voudrais éviter dans l'enseignement de la biologie est celui de l'anthropocentrisme. Beaucoup de choses dont on a pensé qu'elles étaient propres à l'homme se révèlent aujourd'hui être partagées par beaucoup d'espèces. Ainsi l'anthropocentrisme est un obstacle à la compréhension adéquate des phénomènes vivants. Cela empêche de voir des parallèles, des similarités entre les problèmes biologiques rencontrés par des espèces très simples et ceux rencontrés par l'espèce humaine. De ce point de vue, anthropocentrisme et anthropomorphisme s'opposent et un anthropomorphisme bien tempéré pourra en fait être fécond. Celui-ci pourra aider à prendre conscience de la continuité du vivant. Dans le monde vivant, en fait, nous sommes tous descendants de la même cellule, nous avons toute une histoire en commun, et il est important de tirer toutes les conséquences de ce fait.

Un quatrième sujet auquel il faut faire attention est la notion de race. Je lisais, il y a quelques années, un article du journal *Le Monde* écrit par un biologiste et une littéraire, qui mettaient en avant l'idée qu'il fallait remettre la notion de race en valeur. Or si la biologie montre quelque chose, c'est bien que les races n'existent pas. En

biologie comme dans le langage commun, on utilise le mot de « race » uniquement quand on parle d'animaux domestiques. On parlera d'une race de cheval, de vache ou de chèvre... La notion de race est indissociable de celle de domestication. En y faisant attention, nous ne serons peut-être pas étonné du fait que souvent la notion de races humaines est là aussi intimement liée à une vision utilitaire et de domestication, telle que la pratique de l'esclavage. La réalité biologique est différente. Ici, la notion juste est celle de « variété ». Tant qu'on est dans la même espèce, ces variétés sont continues. Il n'y a pas de discontinuité dans l'espèce, comme les racistes pensent qu'il en existerait entre les races.

Il faudra enfin prendre garde à ce que j'appellerai les pièges éthiques, dans lesquels on tombe quand on confond biologie et médecine. Par exemple, j'ai un collègue qui a demandé à ses étudiants de prendre à l'intérieur de leur joue un peu de cellules, qui sont très faciles à décrocher puis à mettre sous le microscope. Ses étudiants l'ont fait et ont regardé leurs cellules, jusqu'à ce que l'un d'entre eux découvre que les cellules de sa joue avaient toutes deux noyaux. Or deux noyaux, ce n'est pas normal. Qu'est-ce que cela voulait dire ? Personne n'en savait rien. L'étudiant était en bonne santé. Était-ce un sujet risquant de développer un cancer dans les années à venir ? Le fait est que cet étudiant a été traumatisé. Donc il faudra toujours faire très attention quand on passera à la dimension expérimentale de l'enseignement et qu'on utilisera du matériel de la vie quotidienne. Encore un exemple : quand on étudiera la ségrégation des allèles classiques, la couleur des yeux et d'autres phénomènes de ce genre, les bons élèves risquent de réaliser qu'un de leur parents n'est pas leur parent biologique...

Le dernier point qui me paraît très important quand on enseignera la biologie (et c'est plus vrai pour la biologie que pour les sciences de la Terre), c'est la grande quantité d'idées fausses répandues dans l'opinion. Il y a celles qui sont dues à la vieille classification hiérarchique d'Auguste Comte : mathématiques, physique, chimie, biologie. Cela induit énormément d'erreurs, que les enfants doivent désapprendre. Autre exemple : tout le monde pense que la sexualité est un mode de reproduction, or c'est vrai pour l'homme et les animaux, mais ce ne l'est pas, par exemple, pour les

champignons. Les cellules de champignons se rencontrent et fusionnent. On a alors  $1 + 1 = 1$ , donc on a perdu des cellules, au lieu d'en fabriquer de nouvelles. Ce n'est donc pas de la reproduction. Mais c'est quand même de la sexualité, parce qu'on passe d'un système haploïde à un système diploïde qui va un jour reconstruire de l'haploïde ; d'un système qui a une copie de chaque chromosome à un système qui en a deux copies, qui va ensuite pouvoir revenir à une copie unique pour chaque chromosome. La fonction de ce cycle, qui consiste à re-brasser les chromosomes, est d'assurer l'élimination de variants génétiques inadaptés ou endommagés. Si un gène mute sur un chromosome, l'autre va prendre en charge la fonction, donc celle-ci ne va pas disparaître. Si maintenant je suis haploïde, cette mutation ne me permettra pas de survivre, donc je disparaîtrai. D'une part, on peut supposer qu'il est préférable, pour une espèce, d'être haploïde, puisque, ceci impliquant une forte mortalité, l'espèce ne cumulera jamais de mutations qui inactivent le gène. Mais, d'un autre côté, le diploïde peut utiliser la copie qui n'est pas mutée pour réparer la copie mutée, donc il apporte un mécanisme de réparation. Comme aucun des deux systèmes n'est optimal, le vivant profite des deux en passant régulièrement de l'un à l'autre. C'est là une des origines probables de la sexualité, et non la reproduction.

Chez les animaux, la phase haploïde est réduite uniquement à la gamète, c'est-à-dire à l'ovule et au spermatozoïde. La situation est différente chez les plantes à fleur, où la cellule haploïde va faire tout un tissu avant de former un ovule. Sans parler de plantes qui ont gardé une biologie plus ancienne comme les fougères et les mousses : il y a des fougères haploïdes et des fougères diploïdes. Il en est de même chez les mousses. Donc, chez les fougères et les mousses, la sexualité ne sert pas en soi à la reproduction, même si elle y est associée. C'est une règle générale chez tous les organismes unicellulaires qui ont une sexualité.

Ainsi, vous le voyez, il faut réapprendre beaucoup de choses qu'on pensait avoir comprises. Le même processus, par exemple la reproduction, a suivi différents mécanismes au cours de l'évolution, adaptés à des contextes variés. De même, la sexualité a servi diverses fonctions au cours de l'évolution, avant de devenir la forme unique de reproduction dans la majorité du monde animal. C'est dire la

complexité du problème et la multitude des causalités. Il faudra aussi veiller à ne pas fonctionnaliser, c'est-à-dire à ne pas supposer qu'il y aurait un « plan » derrière chaque phénomène. Il n'y en a pas, il y a seulement des raisons pour lesquelles les choses sont là. Les choses sont ce qu'elles sont non pas parce qu'elles ont été *faites pour* cela, mais *parce qu'*elles marchent comme cela. En biologie, la causalité est souvent *a posteriori*, non *a priori*.

### ***La diversité du vivant. L'importance méconnue des organismes unicellulaires.***

Supposé qu'on ait pris garde aux problèmes que j'ai évoqués – et je suis sûr que ma liste n'est pas exhaustive – comment enseigner les sciences de la Vie et de la Terre ? La première chose à laquelle il faudra faire attention dans les petites classes, c'est le vocabulaire. D'autre part, je fais mienne la remarque de Laurent Lafforgue au sujet de l'enseignement des mathématiques : il ne faut pas faire trop de choses, mais les faire bien, en profondeur. Il faut s'assurer que les élèves comprennent vraiment. Et comme il faut faire la part belle à l'observation et au sens du détail, il vaut mieux approfondir quelques sujets, plutôt que de chercher à donner une vue d'ensemble exhaustive de la biologie, qui est tellement vaste que cette vue ne pourrait être que superficielle.

Avec les plus jeunes, un programme idéal devrait partir des *écosystèmes*, niveau de complexité adéquat pour démarrer. Sinon, on pourrait croire qu'il faut se placer d'abord au niveau de la chimie moléculaire, ou à celui de la cellule, ou encore au niveau de l'organisme. Mais j'ai dit tout-à-l'heure qu'enseigner la biologie, c'est enseigner les mécanismes de la diversité, et que cette diversité se construit en histoire. Donc, pour être directement confronté à cette diversité, il est correct de commencer par le biotope.

Par exemple : une prairie de printemps. Classiquement, dans la belle prairie de printemps, il y a trois fleurs : les fleurs jaunes, les fleurs rouges et les fleurs bleues. Mais, quand on commence à étudier de près ce milieu, on se rend compte qu'en fait il y a au moins une vingtaine d'espèces de fleurs jaunes, autant de fleurs bleues, sinon plus, et, en définitive, très peu de fleurs rouges. En outre, sur chacune

de ces fleurs, il y a une multitude de bactéries. Même *sous le sol* il se passe énormément de choses. Donc, étudier avec quelque détail un biotope particulier, c'est prendre conscience d'emblée de la diversité du vivant. Et l'on doit s'assurer que, quand on fait cette étude d'un écosystème, on ne s'arrête pas seulement aux gros être multicellulaires, les arbres et les animaux, mais on dirige l'attention des élèves sur les microbes, qu'ils soient pluricellulaires ou unicellulaires, et sur la richesse des organismes unicellulaires. Car si l'on regarde l'arbre phylogénétique, on constate que les êtres multicellulaires sont seulement la pointe d'*une* des branches de cet arbre ; tout le reste, c'est de l'unicellaire. Ce monde des unicellulaires est d'une variété, d'une richesse dont ordinairement on n'a pas idée. Il faut les étudier et se rendre compte qu'ils ont des propriétés finalement très similaires à celles des êtres pluricellulaires.

Beaucoup d'êtres qu'on considérait jadis comme très rudimentaires ne le sont nullement. Ils ont autant de temps d'évolution que nous. La majorité des êtres unicellulaires ont un œil, appelé stigma, et quand on regarde à partir de quels enzymes ce stigma fonctionne, on constate que ce sont les mêmes enzymes que dans nos yeux à nous. Et ils font jouer les mêmes mécanismes : ils ont un cristallin qui leur permet de s'orienter, ils ont des pigments qui sont les mêmes que dans nos yeux. Cela va même plus loin, puisque les chercheurs qui s'intéressent au développement multicellulaire ont fait des études fouillées pour comprendre comment se structure l'œil de la mouche ou de la souris, et ils se sont rendu compte – ô surprise ! – que l'œil de la mouche demande un certain nombre de gènes qui sont les mêmes chez la souris, alors que ces yeux ne se ressemblent pas du tout. Les gènes à la base de la formation de ces yeux sont les mêmes. On dira que ce sont des animaux et qu'ils ont donc tous en commun le plus ancien des animaux qui peut-être a inventé ces gènes pour pouvoir réguler la formation de ces pigments au bon endroit, au bon moment, dans des structures appropriées. Et l'on a donc longtemps pensé que c'est le règne animal qui a créé ces gènes. Pas du tout ! Ils existent déjà chez les organismes unicellulaires, et là, déjà, ils gouvernent la formation du stigma.

Je rappelle qu'un gène est un tronçon d'ADN dont la séquence encode la séquence primaire d'une des protéines de la cellule ou de

l'organisme, suite à sa transcription en ARN et à la traduction de la séquence ARN en une séquence d'acides aminés par la machinerie de synthèse des protéines, c'est à dire le ribosome et ses facteurs associés. Or, si, dans l'arbre de l'évolution, on prend non pas les branches les plus proches de celle sur laquelle nous sommes assis avec les autres animaux, mais des branches qui se sont séparées du tronc commun il a bien plus longtemps et sont peuplées d'organismes unicellulaires très exotiques par rapport au animaux, tels que l'Euglène par exemple, donc si l'on s'intéresse à des organismes dont le plus ancien ancêtre commun avec nous est distant de quelque deux milliards d'années, on constate que ces organismes contiennent déjà un stigma et que les gènes nécessaires à sa formation sont très similaires, on dit homologues, à ceux gouvernant la formation des yeux des insectes et des mammifères. De façon stupéfiante, ce n'est pas seulement vrai des gènes qui codent pour les constituants des yeux, par exemple les protéines impliquées dans la perception de la lumière, mais aussi ceux qui coordonnent la formation de l'œil au bon endroit et au bon moment pour faire la bonne structure. Ces observations nous indiquent que l'ancêtre que nous avons en commun avec ces organismes et qui vivait il a quelque 2 milliards d'année avait déjà un appareil oculaire formé selon des principes tout à fait similaires aux yeux des êtres unicellulaires et des animaux d'aujourd'hui, et a transmis les gènes impliqués jusqu'à nous, mais aussi jusqu'aux Euglènes pour former leur stigma. De façon encore plus remarquable, ces observations nous indiquent que si les plantes n'ont pas d'yeux, leur ancêtre, qui est le même, en avait ! Ce sont donc les plantes qui ont donc perdu la vue au cours de leur évolution, et non les animaux qui l'ont acquise !

Ainsi, il y a dans le monde unicellulaire une richesse extraordinaire dont il faut faire prendre conscience à ceux qui entament l'étude de la biologie. D'autant plus que, même d'un point de vue utilitariste, il est essentiel de bien comprendre ce monde. Certains disent : cela ne sert à rien, ce n'est pas ça qui va nous soigner du cancer. Peut-être. Mais ce sont les organismes unicellulaires qui, dans les océans, fixent le CO<sup>2</sup>. Je pense que les solutions d'un bon nombre de problèmes que l'humanité aura à affronter dans les décennies qui viennent sont à trouver dans des organismes dont on a

peu idée aujourd'hui, et que parfois nos grands-pères connaissaient mieux que nous. Il faut initier les élèves, dès le début, à prendre conscience de cette diversité du vivant.

Quelque chose que je voudrais recommander aussi pour la formation des élèves, c'est de les faire dessiner. Pour décrire, il n'y a rien de tel que le dessin. Or on est en danger de négliger cet outil de formation à cause des dispositifs informatiques qui pullulent aujourd'hui. En classe, il faut, bien plutôt, avoir des tableaux ! De la couleur que vous voulez, mais des tableaux où l'on puisse écrire et dessiner, et du papier, des crayons, beaucoup de couleurs.

Je parlais tout à l'heure du désenchantement du monde par la science. La biologie, d'une certaine façon, apporte au contraire un ré-enchantement devant l'immensité de son objet, et elle conduira les élèves à s'émerveiller devant la richesse du monde.

Dans notre programme, il faut essayer de rester le plus comparatif possible, c'est-à-dire ne pas se limiter à la biologie végétale ou à la biologie animale. Certes, les végétaux et les animaux sont séparés dans leur façon d'assurer un certain nombre de fonctions. Mais ils cherchent aussi à résoudre des problèmes très similaires. Donc ce qui est le plus intéressant, ce n'est pas de comprendre, d'un côté, comment la plante fonctionne et, de l'autre, comment l'animal s'en sort, mais quelles sont les similarités et les différences entre les mondes animal et végétal. Quelles solutions ont-ils respectivement choisies, et pourquoi ? Quels sont les avantages et les inconvénients de ces solutions, au niveau animal, végétal, pluricellulaire, unicellulaire ?

Dans un écosystème, précisément, on trouve déjà toute cette variété. Que ce soit la prairie de printemps, l'étang, les sous-bois, on se trouve à chaque fois devant un écosystème qui a sa vie propre. Et ce qu'on va trouver là-dedans c'est que chaque élément de l'écosystème a en soi déjà tout l'essentiel de la biologie. Un unicellulaire le plus stupide qu'on puisse imaginer – sauf que je n'en ai jamais vu de stupide jusqu'à maintenant ! – a déjà quasiment en soi une proportion absolument remarquable de la biologie en général. Par exemple, mon laboratoire montre en ce moment que les organismes unicellulaires savent apprendre et mémoriser des choses. Pas du



Shakespeare, sans doute, mais des problèmes qui sont à peu près ceux donc Shakespeare parle : être ou ne pas être, Roméo et Juliette, les affres de l'amour et de la sexualité. Depuis les êtres unicellulaires jusqu'à nous, ce sont les mêmes problèmes...

Maintenant, comment concevoir les programmes ? Comment en aménager la progression ? Selon l'hypothèse de travail de ce Séminaire, je me suis posé la question de ce que devrait être, idéalement, un bon programme des sciences de la Vie et de la Terre de la 6<sup>ème</sup> au bac, mais je ne me suis pas demandé si c'était possible compte-tenu des structures actuelles de l'éducation. Je me suis tout de même demandé si le programme que j'allais proposer était compatible avec l'avancement des autres disciplines scientifiques. Elles ne doivent pas suivre chacune son chemin en ignorant les autres. Au collège et au lycée, les enseignements scientifiques doivent être coordonnés. Il faudrait, par exemple, que le professeur de biologie puisse compter sur l'acquisition de certaines notions chimiques par les élèves. Mais organiser cette coordination des disciplines scientifiques dans le secondaire n'est pas mon propos ici.

Il me faut coordonner du moins les sciences de la Vie et les sciences de la Terre qui, comme je l'ai dit, sont liées par nature. L'histoire de la Terre conditionne l'histoire de la Vie et l'histoire de la Vie a eu, en retour, un impact sur l'histoire de la Terre. Donc ces deux choses-là vont ensemble et il faut les considérer d'un point de vue historique.

Je vais d'abord esquisser les grandes lignes de ce que pourrait être la progression de la 6<sup>ème</sup> jusqu'au bac. Ensuite, je pourrai revenir plus en détails sur le programme de chaque classe.

## II – Les grandes lignes d'un programme pour le collège et le lycée

### 6<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup>

Dans les petites classes, 6<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup>, il conviendrait de se focaliser d'abord sur l'observation de la diversité des formes. Et donc de s'intéresser à l'arbre phylogénétique. Il y a d'abord les grands classiques : les végétaux, les champignons, les bactéries, les animaux.

Mais ce n'est qu'une toute petite partie de l'arbre des espèces. Voyez les falaises de Normandie : elles sont faites entièrement de fossiles d'organismes que je n'ai pas encore cités, les foraminifères, qui ne sont ni des végétaux, ni des animaux, ni des champignons, ni des bactéries, mais des protistes. Les protistes sont des êtres vivants qui, à l'origine, ont un ancêtre commun avec les animaux, les végétaux et les champignons, mais s'en écartent ensuite. Si l'on regarde l'arbre phylogénétique, on voit une grosse branche qui donne les végétaux tels qu'on les connaît, les multicellulaires, ce qu'on appelle les plantes terrestres. Il y a, par ailleurs, une petite branche tout en haut qui va donner les animaux. Mais tout le reste des branches, ce sont les protistes, d'une diversité extraordinaire. Ils sont généralement monocellulaires, parfois bicellulaires avec des tailles de cellules qui peuvent être très variées. Certains êtres simples peuvent s'étendre sur des kilomètres, comme le font certains champignons ! Faire constater aux plus jeunes cette diversité des formes de la vie, et ceci dans le contexte d'un écosystème où l'on montrera que ces organismes n'existent jamais seuls, mais en relation avec d'autres, donnera une fondation solide pour penser le vivant. Nous enseignerons cela pendant les deux premières années. Il faut donner cette base aux jeunes élèves avant de se concentrer sur des choses plus précises. Au niveau théorique, on introduira la notion d'Évolution et la théorie de Darwin comme moyen de comprendre l'origine de cette diversité et son histoire, ou au moins ce que l'on en connaît.

En ce qui concerne les sciences de la Terre, il faut commencer par l'histoire de la Terre et des continents, et permettre aux élèves d'en comprendre les traces que sont les fossiles et les cristaux. Cette étude permettra de constater comment certains animaux ou leurs fossiles sont présents sur certains continents ou sur certaines îles, mais pas sur d'autres, et donc qu'il y a des liens forts entre l'histoire de la terre et l'histoire de la vie.

#### 4<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup>

Dans les deux années qui suivent, il faut présenter les premiers concepts abstraits, c'est-à-dire les grandes fonctions biologiques : nutrition, détoxification, communication... Il est essentiel de comprendre qu'il n'existe pas d'espèces où il n'y ait pas de modes de

communication entre individus. Les bactéries se communiquent de l'information entre elles, tout comme nous. Bien sûr, elles ne parlent pas, mais leur niveau de communication par signaux chimiques est généralement beaucoup plus sophistiqué qu'on ne le pense. Moi-même, je me suis vu confronté récemment à la découverte que l'organisme que j'étudiais avait tout un pan de langage qu'on n'avait jamais pris vraiment en considération parce qu'on pensait qu'il était trop rudimentaire. Il faut aussi présenter la notion de réponse aux perturbations, aux dangers, au stress, et celle de reproduction.

Comment étudier ces grandes fonctions biologiques ? De la façon la plus comparative possible. C'est ainsi qu'on se rendra compte, par exemple, que la sexualité existe chez les eucaryotes, c'est-à-dire les animaux, les plantes, les champignons, les protistes dont je vous ai parlé, mais pas chez les bactéries qui sont des procaryotes. Mais par contre un processus assez similaire, appelé parasexualité existe là aussi, indiquant qu'un principe, une nécessité sous-jacents sont partagés entre les procaryotes et les eucaryotes même si ils s'expriment sous des formes différentes. En quelque sorte, la sexualité se retrouve partout. Même si elle n'existe pas sous les formes que nous connaissons, elle est réinventée sous de nouvelles formes.

On peut parler aussi, dans ces classes, de croissance et de nutrition. Car même les unicellulaires ont une croissance. Ils commencent comme de toutes petites cellules qui deviennent plus grandes, avant de se diviser pour se reproduire et proliférer. Et l'on commence à découvrir – mais c'est très récent – qu'ils ont une véritable histoire de vie, au sens où il y a des choses que ces organismes unicellulaires font quand ils sont jeunes, et d'autres seulement quand ils ont déjà acquis un certain âge. Ils sont sujets à maturation. Donc, là encore, il faudra être comparatif : quand on parlera de la détoxification ou de la nutrition, il faudra mettre en parallèle l'animal, le végétal et toute une série d'unicellulaires qui font des choses très similaires ou très différentes.

Que deviendront les sciences de la Terre pendant ce temps ? Après avoir vu l'histoire générale, il faudra initier les élèves aux grands mouvements de la Terre. On s'intéressera au volcanisme, aux mouvements de la croûte, aux phénomènes d'érosion, de

sédimentation, et on commencera à s'intéresser aux questions de climat.

L'idée est qu'à la fin du collège, les enfants n'aient sans doute encore aucune connaissance abstraite de la biologie comme on la pratique maintenant, c'est-à-dire la biologie moléculaire – celle que l'on ne voit pas –, mais qu'ils aient par contre une très bonne vue de tout ce que la biologie peut offrir à un niveau macroscopique et microscopique (c'est-à-dire de ce qu'on peut voir avec des microscopes). Jusqu'à la fin du collège, on ne parlera pas donc d'ADN. On s'intéressera à des problèmes d'hérédité, de reproduction, de variété, etc., ce qui donnera aux enfants un sentiment très développé de ce que c'est la vie de façon empirique. C'est seulement alors qu'ils pourront s'intéresser à ce qu'il y a « en dessous », ce que l'on fera en classe de 2<sup>de</sup>.

## 2<sup>de</sup>

C'est ce qui marquera le passage du collège au lycée. A l'arrivée au lycée, on sera confronté à quelque chose de tout-à-fait nouveau, les bases moléculaires de la vie. C'est alors qu'on parlera de ce dogme fondamental de la biologie qui est que l'ADN se transcrit en ARN, lequel permet la synthèse de protéines, et que l'ADN est la « banque de données » de tout être vivant. On fera la même chose pour les roches. On montrera ce qu'elles nous enseignent sur l'histoire de la vie par leur composition et leur structure, puisque la majorité des roches sont faites à partir de matériel d'origine vivante. Tout le calcaire, toutes les roches sédimentaires – toutes les constructions de Paris, par exemple ! – c'est du fossile. On parlera aussi de roches cristallines, tel le granite, qui arrivent à des moments différents dans l'histoire de la Terre et nous renseignent sur la vitesse à laquelle les magmas ont refroidi, dans des endroits particuliers associés à des événements géologiques particuliers tels que la formation des chaînes de montagnes. Mais cela aussi a interféré avec l'histoire de la vie, puisque ces événements ont changé l'environnement et les écosystèmes. On le voit bien au niveau biologique : les écosystèmes sur des terrains cristallins et les écosystèmes sur des terrains calcaires sont très différents. On n'entrera pas dans trop de détails à ce sujet avec les élèves de 2<sup>de</sup>. On devra du moins leur faire comprendre que

les roches, particulièrement les roches sédimentaires, contiennent quantité d'informations, par exemple sur les conditions passées du climat.

### 1<sup>ère</sup>

À partir de là, il faudra enseigner aux élèves comment cette base moléculaire dont on a parlé assure des fonctions. Il faudra s'intéresser particulièrement au mécanisme d'homéostasie, c'est-à-dire à la manière dont l'organisme assure sa stabilité en s'autorégulant. Les systèmes biologiques se connaissent eux-mêmes et ne survivent que grâce à cette connaissance de soi. C'est à cela que l'on pourrait consacrer la classe de 1<sup>ère</sup> : à montrer comment fonctionnent ces auto-régulations, par exemple comment les organismes produisent de l'insuline qui leur permet de s'assurer qu'ils ne sont jamais en excès ni en défaut de sucre ; comment les cycles de reproduction sont associés à des cycles hormonaux.

Au niveau des sciences de la Terre, ce sera le moment d'entrer dans une analyse plus fouillée de la structure du globe terrestre. On s'intéressera au magma, à ses différentes couches, à sa composition – mais ici, les liens entre sciences de la Vie et sciences de la Terre sont plus ténus.

### Terminale

Je consacrerai la Terminale à ce qui est le plus intéressant et qui ferme le cercle. On avait vu dès la 6<sup>ème</sup> que le vivant est essentiellement divers. On étudiera en Terminale les mécanismes qui engendrent cette variété.

Nous sommes tous des humains, mais pourquoi n'y en a-t-il pas un qui ressemble à l'autre dans cette pièce ? Le fait qu'il n'y ait pas deux individus identiques est un beau problème de la biologie. S'il existait des individus parfaitement identiques, ce serait probablement catastrophique au niveau biologique, pour de nombreuses raisons. En tout cas, c'est un fait que la vie investit énormément d'énergie et mobilise de nombreux mécanismes afin de créer de la diversité, de s'assurer que tout se diversifie. Par exemple, le fait d'être capable d'apprendre, c'est une façon de créer de la diversité.

Passons à nouveau en revue les classes de la 6<sup>ème</sup> au baccalauréat, mais en entrant cette fois dans le détail des programmes.

### III - Le programme détaillé

#### 6<sup>ème</sup> et 5<sup>ème</sup>

Dans les petites classes, on aura donc choisi un écosystème. À Paris, la Seine peut-être ? En tout cas, un écosystème du cru, qu'il s'agisse de la prairie de printemps, de l'étang, de la mare à canards de l'autre côté du mur de l'école... Mais il s'agit d'en faire une étude approfondie, d'y retrouver tout ce qu'il y a à y retrouver : des êtres allant de l'unicellulaire au multicellulaire, du végétal à l'animal y compris les champignons, qui se présentent sous une multitude de formes. Si l'écosystème choisi n'est pas trop pauvre – mais, en général, il ne l'est pas – tout y sera.

La première étape est d'amener les enfants à réaliser la multitude des espèces dans des échelles de longueurs très différentes. Cela permettra d'introduire la notion de « niche écologique ». Différentes espèces vivent dans un endroit particulier où elles sont bien adaptées à l'environnement et les unes aux autres. Par exemple, on verra que certaines plantes ne poussent qu'à côté l'une de l'autre, ce qui signifie qu'elles s'aident à vivre. La niche d'une plante est l'autre plante. De la même façon, certains insectes ne vont vivre qu'en relation avec certaines plantes, qui sont leur niche. On verra comment les écosystèmes se structurent de façon extrêmement sophistiquée, avec des relations très complexes de collaborations entre espèces autant que des relations de prédation, de parasitisme, de commensalisme. Donc on commencera à comprendre la relation entre les espèces, la chaîne alimentaire, les cycles du carbone et de l'azote, les effets de coopération et les effets de communication.

Ceci suppose évidemment que les enseignants soient très renseignés sur ces sujets et qu'ils sachent trouver des exemples. Ils devront faire preuve d'imagination. Mais, par exemple, en ce qui concerne la communication, l'expérience montre que plus on la cherche, plus on la trouve. La façon dont les plantes communiquent entre elles, avec des canaux dont on n'a généralement pas idée, est

extraordinaire. Les insectes communiquent entre eux par de nombreuses voies à l'intérieur de chaque espèce et parfois entre espèces.

En regardant la chaîne alimentaire, on s'intéressera aux flux de matières. Il faudra faire comprendre qu'il y a des problèmes énergétiques et que la source d'énergie originaire est toujours la même, le Soleil. On présentera ensuite la notion de rythme biologique. L'écosystème étudié vit sous un rythme circadien, trait commun à tous les êtres vivants de cette planète, qui ont évolué avec la même durée du jour. Tous les êtres vivants, ou du moins la grande majorité d'entre eux, savent quand la nuit va arriver et comment il faut se préparer à la nuit, quand le jour va arriver et comment il faut se préparer au jour. Une plante, par exemple, est capable de calculer quelle quantité de glucose il faut qu'elle garde en réserve pour en avoir suffisamment jusqu'à la fin de la nuit, puisqu'elle fabrique le glucose pendant la journée et le consomme pendant la nuit. Il faut avoir plus de glucose en réserve en hiver qu'en été puisque la nuit est plus longue, ou alors il faut l'utiliser plus lentement. Les plantes savent faire cela, gérer les rythmes diurnes et aussi les rythmes saisonniers.

Une autre chose sur laquelle il faudra attirer l'attention des enfants, c'est que tout écosystème est en permanence soumis à des perturbations, que l'écosystème dans son ensemble et les êtres lui appartenant sont généralement capables de gérer. Ils répondent à ces perturbations qui surviennent de façon sporadique. Par exemple, la mort soudaine d'un renard peut avoir des conséquences néfastes sur les bourgeons des arbres puisqu'alors la proie du renard se met à proliférer et dévore la végétation.

Quand on aura vu un premier écosystème, il faudra rapidement se poser la question de savoir comment les choses se passent ailleurs, comment d'autres écosystèmes se forment, ce qu'ils ont en commun et ce qu'ils ont de différent. Il ne faudra pas avoir peur d'introduire la dimension historique : souvent, la raison pour laquelle un écosystème est structuré d'une certaine façon, c'est son histoire, avec la dimension de contingence qui est liée à cette notion. Par exemple, l'écosystème d'un champ est ce qu'il est parce qu'un beau jour, des voisins y ont relâché un couple de rongeurs qui s'y est installé.

Il faut aussi pousser les enfants à observer la variété non seulement entre espèces, mais aussi à l'intérieur d'une espèce, y compris l'espèce humaine : couleur des cheveux, couleur des yeux, etc. Cette diversité existe aussi chez les unicellulaires, ce qui est étonnant puisque ces organismes sont clonaux, c'est-à-dire ont tous le même génome.

Toutes ces approches expérimentales – écosystème, diversité biologique, – prendront environ un tiers du temps. Le deuxième tiers sera consacré à l'histoire de la Terre. On présentera l'histoire de la formation de la planète et l'on donnera des notions d'échelles de temps. On s'intéressera aux fossiles et aux cristaux, on dira quelles sont les différentes parties de la planète et les différents types de roches. On introduira au passage les différents modes de datation, c'est-à-dire les différentes manières dont on peut dater les terrains en fonction de ce qu'on y trouve. Cela conduira le professeur à parler de la structuration des continents et de leur dérive. La dérive des continents permet de voir les liens étroits qui existent entre histoire de la Terre et histoire de la Vie.

On pourra faire remarquer aux élèves que si un certain nombre de mammifères n'existent qu'en Australie, c'est parce que l'Australie s'est séparée des autres continents avant que ces animaux n'apparaissent, ce qui les a empêchés, par définition, de se répandre sur le reste de la planète. Ou comment l'histoire de la dérive des plaques continentales a eu un impact fondamental sur l'histoire de l'évolution de la vie.

Ceci serait enseigné à la fin de la 5<sup>ème</sup>. J'espère qu'on aura à ce stade des enfants déjà émerveillés, qui auront déjà une notion de la diversité de la Vie et de la Terre et des échelles de temps et d'espace.

Cela permettra de généraliser et, pour le dernier tiers de l'horaire, d'introduire des notions fondamentales telles que celle de cellule, puisque tout être vivant est composé de cellules. Il faudra établir solidement cette donnée de base et, pour cela, présenter le cycle du carbone, les chaînes alimentaires.

Il faudra aussi donner d'autres détails sur l'arbre de la Vie, et introduire sérieusement la notion d'évolution. Les différentes espèces qui existent aujourd'hui sur Terre sont le fruit d'une évolution. On



introduira les notions d'adaptation et d'adaptabilité, et celle de sélection. On introduira les grandes relations biologiques entre organismes que sont la symbiose, le parasitisme, le commensalisme.

#### *4<sup>ème</sup> et 3<sup>ème</sup>*

En 4<sup>ème</sup> et en 3<sup>ème</sup>, on aborde l'étude des grandes fonctions biologiques : nutrition, respiration, croissance, excrétion, détoxification, adaptation, protection, locomotion, communication et reproduction. A ce stade, je n'étudierai pas encore l'immunité, c'est-à-dire les mécanismes par lesquels les êtres vivants reconnaissent sous un angle moléculaire une intrusion d'ordre moléculaire, portée par une bactérie ou un virus. Le but de ces cours sera qu'à la fin de la 3<sup>ème</sup> les élèves puissent se poser la question : comment les tissus et les cellules « savent »-ils ce qu'ils ont à faire en cas d'agression ? Où trouvent-ils cette information ?

Ils pourront s'interroger aussi sur la base des lois de l'hérédité, puisqu'ils auront vu qu'il y a une grande variété de traits à l'intérieur même des espèces. Ils s'interrogeront sur les lois qui font que la couleur des yeux de mes parents détermine celle de mes propres yeux. Il faut étudier les grandes fonctions en les considérant de façon comparée. Lorsque j'ai demandé à mon fils de 16 ans ce qu'il pensait être essentiel dans l'enseignement de la biologie, il a répondu « l'éducation sexuelle ». Il avait peut-être raison d'un certain point de vue, mais ce ne peut être l'axe du cours. Car en usant de la méthode comparative, on pourra donner une grande partie de l'instruction nécessaire en matière de sexualité, sans la réduire à un aspect fonctionnaliste, utilitariste, et en s'ouvrant à d'autres problèmes.

Ce qu'il faudra faire aussi quand on étudiera ces fonctions, c'est de montrer l'impact qu'elles ont eu, au cours de l'évolution, sur la structure des organismes. Par exemple, comment des fonctions ont-elles pu être associées, chez un être multicellulaire, à des organes ? La détoxification se fait dans le foie et dans le rein, la nutrition dans le tube digestif. Ces fonctions-là existent aussi chez les unicellulaires, mais utilisent d'autres structures. Il faudra voir comment ces structures peuvent se retrouver chez les pluricellulaires (par exemple, les structures de détoxification d'un unicellulaire se retrouvent dans les cellules de foie).

Il faudra aussi s'intéresser à la manière dont ces grandes fonctions se répercutent au niveau comportemental, dans des stratégies biologiques que les différentes espèces mettent en œuvre pour trouver leur nourriture, assurer leur reproduction, se protéger. La plante a du mal à prendre ses jambes à son cou quand le prédateur arrive. Il faut donc qu'elle ait une autre solution. Or elle n'en manque pas ! Il faudra mettre en évidence et comprendre ces stratégies.

En présentant la sexualité et la reproduction, on montrera qu'elles ne coïncident pas toujours. Les fougères et certaines plantes se reproduisent de façon végétative. Sur un fraisier, par exemple, il y a souvent une tige qui pousse et va se planter en terre un peu plus loin, ce qui donne un nouveau fraisier. On appelle cela un stolon. Un fraisier peut faire au cours de sa vie 5, 6, 7 ou 8 stolons qui feront eux-mêmes des stolons. Conséquence : on peut très bien manger toutes les fraises d'un fraisier sans l'empêcher de se reproduire ! La reproduction sexuée, c'est la fabrication des graines dans la fraise ; si vous les mangez, il n'y a pas de reproduction sexuée possible, mais, grâce au stolon, la reproduction végétative continue. Par contre si une souris ou une limace mange la fraise, généralement les graines à la surface de la fraise sont résistantes à la digestion par ces animaux qui servent maintenant de vecteurs pour aller redéposer ces graines plus loin encore... De nombreuses plantes se reproduisent ainsi, en combinant des stratégies végétatives et de reproduction sexuée, ou parfois en utilisant seulement l'une ou l'autre. De même, on peut très bien s'intéresser à la croissance bactérienne, qui est exponentielle dans différents type de milieux. Lorsque toutes les sources nutritives ont été utilisées, l'organisme est obligé de se mettre dans une nouvelle forme qui s'appelle une quiescence, un repos, qui lui permet de survivre pendant la période où il n'y a pas d'aliments.

Pour pouvoir introduire correctement toutes ces notions, et que les élèves les comprennent en profondeur, je reviens à l'idée qu'on ne peut pas tout faire. Il vaut mieux probablement se concentrer sur quelques fonctions qu'on approfondira particulièrement. On passera ensuite plus rapidement sur d'autres.

En sciences de la Terre, on parlera du volcanisme, du mouvement des plaques, des tremblements de terre, des failles, de la dépose sédimentaire, de l'érosion. On pourra s'intéresser à la notion

de série stratigraphique, à la manière dont on peut dater les terrains en fonction des différentes couches et des différents fossiles qu'on retrouve dans chacune d'elles.

## 2<sup>de</sup>

La classe de Seconde est une étape capitale, puisqu'on y présente enfin les bases moléculaires de la vie.

Là, il y a beaucoup de choses très belles à étudier. Il est une chose dont l'importance n'échappera à personne, la transformation bactérienne. Les bactéries ont cette capacité extraordinaire de s'échanger des morceaux d'ADN qui leur confèrent une résistance aux antibiotiques. C'est vraiment de l'« altruisme » entre bactéries, qui pose des problèmes graves à la médecine ! Quand on traite les maladies infectieuses avec des antibiotiques, on induit des résistances aux antibiotiques dans un certain nombre de bactéries, dont celles avec lesquelles nous sommes nous-mêmes en symbiose.

Vous savez que, dans votre corps, vous avez plus de bactéries que de cellules humaines, environ 10 fois plus. La flore intestinale – pour ne parler que d'elle, mais ce n'est pas la seule – présente une diversité et un nombre important d'espèces, qui jouent un rôle essentiel pour un grand nombre de fonctions. À tel point qu'on peut s'interroger sur ce qu'est vraiment l'être humain. Est-ce l'être si développé auquel on pense classiquement, ou n'est-ce pas plutôt le simple véhicule des bactéries ? Ne se réduit-il pas à être une niche écologique pour toutes les bactéries qui s'en servent comme d'un hôte bien commode pour assurer leur développement ? On peut parler de cela sur le mode de la plaisanterie, mais c'est une question sérieuse... On se rend compte de plus en plus qu'un certain nombre de maladies peuvent avoir comme origine un problème de relation de l'individu avec sa flore intestinale. Par exemple l'obésité, le diabète, sont sans doute dus à des déséquilibres de ce genre.

Le virus Zika, dont on parle beaucoup en ce moment, est absolument extraordinaire. Il influence la façon dont l'organisme se comporte, il s'arrange pour que l'organisme atteint s'expose aux moustiques ! De même, il existe un protiste, *toxoplasma gondii*, qui est le parasite à l'origine de la toxoplasmose. Sa niche écologique est

le chat et les autres félins. Cette bactérie fait tout pour se retrouver chez les félins, c'est-à-dire chez elle. Alors qu'une souris saine fuit lorsqu'elle sent une odeur d'urine de chat, signal de danger pour elle, elle a un comportement différent lorsqu'elle est infectée par l'organisme en question. Dans ce cas, elle est *attirée* par les odeurs d'urine de chat ! C'est la façon qu'a trouvée *Toxoplasma gondii* pour retourner chez le chat, sa niche écologique, comme s'il savait que toute souris s'approchant d'un chat avait toute chance d'être mangée par lui. Ce machiavélisme est impressionnant ! Mais on sait que c'est une de ces fonctions-là qui, probablement, agissaient chez l'humain au temps où on vivait dans la savane et où *Toxoplasma gondii* s'arrangeait pour que les hommes se fassent dévorer par des lions. Le protiste induisait les symptômes de la toxoplasmose qui fragilisaient l'homme face aux fauves. En d'autres termes, la maladie n'est pas là simplement *parce que* nous avons dans le sang un être vivant qui nous rend malade, elle est là *pour* qu'une bactérie ou un autre parasite atteigne leurs buts à eux.

La transformation bactérienne est quelque chose qu'on peut faire en laboratoire très facilement. Cela montrera aux élèves comment les bactéries peuvent acquérir des propriétés qu'elles n'avaient pas auparavant en échangeant entre elles des fragments d'ADN. Et cela permettra de commencer à comprendre ce qu'est l'ADN et à quoi il sert.

Pour cela, on pourra faire des croisements de champignons ou de levures de bière. Cela permet de voir comment une souche A de levure de bière qui a certaines propriétés, et une autre souche B qui a d'autres particularités, peuvent se croiser (puisqu'elles ont une sexualité) et aboutir au fait qu'après le croisement on trouve différents réassortiments de ces caractères qui suivent des lois très strictes – les fameuses lois de Mendel. Cela permet de comprendre ce qu'est un gène, et qu'il se comporte comme une entité discrète.

On traitera aussi des virus. Il y a des virus qui savent s'attaquer aux bactéries, les bactériophages. On peut très bien en démontrer l'existence de façon simple en laboratoire. Donc toutes ces observations mettront en évidence des règles simples de ségrégation des gènes, des déterminants héréditaires. On pourra dire quelle est leur nature chimique et montrer qu'il s'agit d'ADN.

À partir de là, on pourra donner les contenus théoriques de base sur les ADN, ARN, protéines, tout ce qui constitue le dogme central de la biologie moléculaire moderne. On pourra expliquer comment l'ADN se réplique. Cela permettra d'entrer dans un certain nombre de choses intéressantes : notion de caryotype, comparaison entre procaryote et eucaryote ; comprendre la division cellulaire, la méiose ; comprendre comment la méiose aboutit aux lois de Mendel ; se rendre compte que l'ADN peut être affecté ; s'interroger sur ces mutations, leurs cause, la façon dont elles se mettent en place. Cela permettra aussi de commencer à comprendre la variété génétique des êtres vivants. Et l'on pourra décrire ce qu'on sait de l'histoire de l'évolution humaine, par exemple.

### 1<sup>ère</sup>

En 1<sup>ère</sup>, on présentera d'abord le métabolisme et le mécanisme d'homéostasie. On fera comprendre les grandes fonctions au niveau des organes et organismes. On s'intéressera à l'anabolisme et au catabolisme. On montrera comment, au niveau chimique, les nutriments sont pris et utilisés pour en tirer des sources d'énergie.

Dans la cellule, il n'y a pas une cheminée où l'on fait du feu ! Il faut faire comprendre aux élève que toute l'énergétique biologique se fait à basse énergie. On dit que le glucose « brûle », mais il le fait par toutes petites étapes, morceaux par morceaux, atome par atome.

On s'intéressera à la façon dont la cellule se divise et contrôle son cycle de divisions, on montrera comment ces divisions peuvent aboutir à la prolifération des cellules qui permettent la formation d'organes, base de la structure des corps vivants (en anglais, on parle de *patterning*). On entrera dans le détail moléculaire de la communication intercellulaire par laquelle les cellules se « parlent » les unes aux autres. On montrera ce qu'est une hormone, un facteur de croissance, une phéromone. Cela permettra de s'intéresser, par exemple, au rôle de signalisation que joue l'insuline, qui permet le contrôle du glucose. On verra que cette insuline est une hormone qui a une très vieille histoire, puisqu'on la retrouve dans de très nombreux organismes, dont certains très éloignés de nous, et où d'ailleurs l'insuline peut avoir des fonctions un peu différentes de celles qu'elle a chez les mammifères.

On terminera cette première partie du cours de 1<sup>ère</sup> par les mécanismes de l'immunité. Comment les organismes, tant animaux que végétaux, et peut-être même les champignons, sont-ils capables de découvrir la présence d'une invasion par un autre organisme ou par un virus ? Comment l'organisme est-il capable de monter des mécanismes de réactions pour se débarrasser de ces envahisseurs ? C'est un sujet passionnant auquel il faudra consacrer le temps nécessaire. On a récemment montré que même les bactéries ont des procédés d'immunologie, de défense immunologique acquise, c'est-à-dire sont capables d'acquérir les informations sur leurs envahisseurs leur permettant de les reconnaître de façon spécifique. Cela a donné lieu à des progrès technologiques énormes en matière de modification d'ADN et de manipulation génétique, au travers de la découverte de la protéine Cas9, que l'on introduira et dont on expliquera la fonction normale dans l'immunité acquise des bactéries.

### *Terminale*

En Terminale, je voudrais qu'on s'intéresse aux mécanismes de la diversité biologique. Parmi ces mécanismes, il y a la structure des populations et l'évolution par recombinaison de variants génétiques qui sont à la base de beaucoup de processus évolutifs. On s'intéressera à la façon dont les mutations sont fixées dans les génomes ou dans les populations, à la manière dont les mutations sont éliminées, pour se rendre compte qu'en général la majorité des mutations se mettent en place d'abord « en silence », n'ayant aucun effet. Ce n'est que plus tard qu'elles sont éventuellement cooptées pour faire quelque chose d'utile. Mais, au départ, elles sont gardées précisément parce qu'elles sont neutres.

On passera de là aux mécanismes de l'épigénèse, c'est-à-dire à ce phénomène extraordinaire qui consiste en ce que, alors que toutes nos cellules ont toutes le même génome, elles font et fabriquent, au fil du temps, des tissus et des organes complètement différents. Une cellule de l'œil ne ressemble pas à une cellule de peau, de foie ou de pancréas. Parties de ce même génome, donc de cette même information de base, les cellules sont capables de se différencier. Cette différenciation est ce qu'on appelle l'épigénèse, c'est-à-dire la façon dont le système est capable d'apprendre à n'utiliser qu'une partie de

son génome et non le reste, ou même à changer la façon dont il utilise son génome.

On essaie de nous persuader aujourd'hui que nous devons tous faire séquencer notre génome parce que cela dirait tout sur les mutations dont nous sommes porteurs, donc sur les maladies que nous aurions tôt ou tard. Mais c'est faux, et il est essentiel que les élèves comprennent que nous ne sommes pas notre génome. Ce qui compte, c'est ce que nous faisons de notre génome. L'organisme, en faisant des choix, influence la façon dont il utilise son génome. L'environnement influence aussi ce processus. Les mécanismes de mémoire, eux aussi, permettent de créer de la diversité. De ce fait, apprentissage et épigénèse sont liés.

J'achèverai la classe de Terminale sur l'idée que si le vivant a une capacité extraordinaire de différenciation, que tout vient du cas particulier, du spécifique, de la singularité, une des formes extrêmes de la singularité est la maladie.

Je précise qu'on ne parlera, en Terminale, ni de la question de l'existence d'une vie extraterrestre, ni de celle de l'origine de la vie. Car la science ne sait encore rien de certain sur ces sujets. On a supposé que la vie serait venue d'ailleurs, mais il n'y a aucun élément probant qui permette de l'établir, et je pense que c'est mal comprendre la vie que de se passionner pour cette possibilité. Ce qui est intéressant dans la vie, c'est ce qu'elle fait ici, sur cette planète, et ce qu'elle y a fait au cours des 4 derniers milliards d'années, plus que de savoir ce qu'elle aurait pu faire ailleurs. Quant aux origines de la vie, on ne les connaît pas. On sait qu'il y a au moins deux milliards d'années, il y avait ce qu'on appelle le dernier ancêtre commun de tous les eucaryotes qui est l'ancêtre de tous les eucaryotes que nous connaissons aujourd'hui, donc des plantes, des animaux, des champignons, des protistes. On peut reconstruire cet ancêtre commun par les informations figurant dans les génomes des eucaryotes qui en proviennent. Il avait déjà des yeux, une forme de mobilité sophistiquée, il avait beaucoup des éléments nécessaires aux neurones ou pour établir un système immunitaire de base, il avait déjà presque tout. Ce qui revient à dire que nous ne connaissons rien de l'origine de la vie. L'important, ce n'est pas l'existence de cet ancêtre commun, mais qu'à partir de cet ancêtre une multitude d'organismes infiniment

divers aient pu apparaître... C'est là ce que les générations à venir devront comprendre, afin de pouvoir continuer à participer à l'aventure de la vie et ne pas donner un terme abrupt à cette aventure sur notre planète.