

La régulation de la glycémie

Une étude de cas en première S

Patricia Schneeberger, IUFM Aquitaine ; DAEST, université Victor-Segalen-Bordeaux 2 ; patricia.schneeberger@aquitaine.iufm.fr

Manel Dhouibi, étudiante à l'université de Tunis ; dhb_manel@yahoo.fr

L'enseignement/apprentissage de la régulation en biologie a fait l'objet de différentes recherches en didactique (Schneeberger, 1992 ; Rumelhard, 1994). Cette étude s'intéresse à la régulation de la glycémie et propose d'analyser des observations réalisées dans une classe de première S. En reprenant en partie les résultats des recherches antérieures, nous nous interrogeons sur les points suivants :

– la légitimité épistémologique de l'utilisation de la modélisation systémique dans l'enseignement de la régulation de la glycémie ;

– la relation élève/modèle : la manière selon laquelle l'élève construit, s'approprie et applique un modèle formel dans le cadre de la régulation de la glycémie.

Outre une étude épistémologique, nous avons conduit une analyse détaillée d'une séance de débat pour repérer comment les élèves parviennent à appliquer un modèle formel à un cas particulier. Les outils d'analyse du débat ont été conçus à partir des travaux de Martinand et Orange. Ce type de travail contribue à montrer l'importance de l'activité langagière des élèves dans l'élaboration du savoir.

La régulation, d'après Canguilhem (1996), est le concept biologique par excellence et pour Jacob (1970), c'est l'un des concepts sur lequel repose la biologie. Actuellement, on ne peut plus concevoir le vivant sans les différentes boucles de régulation et de rétrocontrôle qui lient les éléments du vivant. Ces interactions deviennent des nécessités à questionner à chaque niveau de l'intégration.

La régulation de la glycémie est enseignée en France en classe de première S en relation avec l'étude du diabète, elle est également enseignée en Tunisie au lycée. En Tunisie, le diabète atteint une proportion importante de la population et

constitue un problème de santé publique¹. Dans ce contexte, l'enseignement de la régulation revêt une importance particulière, ce qui a motivé, en partie, le choix de cette étude.

Le diabète est une maladie connue des élèves, qui disposent d'informations véhiculées, le plus souvent, par les médias. Les connaissances des élèves sont cependant juxtaposées avec une conception naïve du vivant, incompatible avec la compréhension des mécanismes de régulation. L'objet de cette recherche est d'évaluer l'impact d'un enseignement qui met en jeu les principes fondamentaux du concept de régulation en s'appuyant sur des activités de modélisation.

Après avoir présenté le cadre théorique de cette recherche, nous détaillerons une étude de cas effectuée dans un lycée de la région bordelaise. Nous décrirons les apprentissages réalisés au cours de cette séquence et nous essaierons de circonscrire les conditions de possibilité de l'élaboration de tels savoirs.

I. Le cadre de la recherche

I.1. Les choix didactiques

• Première option : l'approche systémique

Les recherches sur lesquelles nous nous appuyons ont montré que l'étude des mécanismes de régulation exige de concevoir les êtres vivants comme des systèmes, c'est-à-dire comme un ensemble d'éléments en interaction.

En rupture avec la méthode analytique linéaire privilégiée dans l'enseignement² de la physiologie au lycée, l'approche systémique permet de mettre en valeur non seulement les fonctions impliquées dans une régulation mais aussi les interactions existant entre ces fonctions.

• Deuxième option : la modélisation

Du fait de sa complexité, un système vivant doit être appréhendé à travers un modèle. Envisager un enseignement fondé sur la modélisation nous amène à nous questionner sur les problèmes que pose un tel apprentissage.

La modélisation d'un système requiert une analyse préliminaire de son organisation (Orange, 1997) qui peut se faire selon deux approches : une approche anatomique et une approche fonctionnelle. Pour l'étude de la régulation de la glycémie, nous avons privilégié cette deuxième approche qui consiste à subdiviser le système

1 La prévalence totale du diabète à l'échelle nationale selon les critères de l'ADA (*American Diabetes Association*) est de 6,3 %, 10 % dans la région de Tunis (Évaluation de l'état nutritionnel de la population tunisienne, Rapport national, République tunisienne, ministère de la santé publique, Institut National de Nutrition et de Technologie Alimentaire, enquête nationale, 1996-1997).

2 L'étude réalisée par Schneeberger porte sur les manuels français datant d'avant 1992. Cette tendance est moins nette dans les manuels actuels de première S mais reste en vigueur dans les manuels tunisiens.

en parties fonctionnelles élémentaires et à rechercher les interactions établies entre ces fonctions. Cette prise de distance avec l'anatomie définit la modélisation formelle dans la biologie.

Le modèle formel choisi dans notre recherche est le modèle cybernétique. Dans le cadre de la modélisation formelle, nous insistons sur les activités de schématisation. Ce choix repose sur les travaux de différents auteurs (Schneeberger, 1994 ; Jebbari, 1994 ; Orange, 1997) qui insistent sur l'aide didactique que peut apporter le schéma dans l'analyse du phénomène de régulation.

• **Troisième option : le débat scientifique dans la classe**

Considérant que les pratiques langagières, au même titre que les autres pratiques, sont constitutives des savoirs, la transposition, pour la classe, des pratiques de la communauté scientifique conduit à considérer le débat comme une situation favorable aux apprentissages.

Notre étude se situe dans le prolongement de recherches en didactique des sciences expérimentales qui s'intéressent aux interactions langagières (Aster 37 et 38) pour montrer comment la prise en compte de différents points de vue et les négociations qui en découlent constituent une étape indispensable dans la construction des savoirs en jeu.

En effet, le débat constitue l'occasion pour les élèves de formuler des arguments et d'explicitier leurs fondements. Les travaux de différents chercheurs (Douaire, 2004) ont montré comment l'argumentation constitue un outil efficace dans la construction du problème, l'exploration des solutions possibles ou la production des énoncés de savoirs.

1.2. Les choix méthodologiques

Cette étude cherche à préciser dans quelle mesure les activités de modélisation favorisent l'apprentissage du concept de régulation. Elle se fonde sur une étude de cas menée dans une classe de première S au lycée Pape-Clément à Pessac³ (près de Bordeaux).

• **Le suivi des apprentissages**

Les progrès des élèves ont été évalués à l'aide de questionnaires (prétest et posttest) et par l'analyse des productions successives des élèves en cours d'apprentissage, en particulier les schémas réalisés au cours des différentes séances.

Les réponses au premier questionnaire (annexe 1) ont permis de révéler, avant apprentissage, l'existence de conceptions différentes de la vie (animiste,

³ Les observations ont été réalisées dans le cadre d'une recherche conduite par M. Dhoubi pour son mémoire de DEA de didactique de la biologie, sous la direction de Schneeberger.

réductionniste ou mécaniste) et l'absence de conceptions de la vie comme organisation et comme information (Canguilhem, 1968⁴).

Certains élèves mobilisent deux conceptions contradictoires, l'autonomie de l'organisme vivant et la dépendance du vivant par rapport à son milieu, pour répondre à une même question⁵. C'est pourquoi, nous pensons que ces deux conceptions se juxtaposent dans l'univers conceptuel de l'élève sans se confronter.

Exemple de réponse mobilisant deux conceptions contradictoires :

« Le glucose doit certainement diminuer pendant la nuit car l'absorption est lointaine (repas du soir) cependant le taux de sucre doit rester assez stable car le corps peut réguler la diffusion du sucre dans le sang... »

La réponse de cet élève montre l'existence de deux conceptions contradictoires du point de vue scientifique : d'une part, l'idée du maintien du taux de glucose sanguin en dehors des périodes digestives et, d'autre part, l'idée de baisse du taux de glucose sanguin en absence d'apport alimentaire. L'affirmation de la diminution du taux du glucose sanguin en cas d'absence d'apport alimentaire renvoie, selon nous, à une conception de dépendance de l'organisme à son environnement alors que l'insistance sur l'obligation du maintien de la constance de ce taux, malgré les perturbations extérieures, se rattache à une conception d'autonomie du vivant. Dans cet exemple, le discours de l'élève exprime deux « voix » dissonantes. L'analyse des réponses au questionnaire a révélé l'existence de nombreux cas similaire d'hétéroglossie (Bakhtine, 1984).

Ce questionnaire permet aussi de montrer que, à propos de la régulation, les élèves ne connaissent qu'une seule fonction : la fonction d'action sur les réserves (utilisation et/ou synthèse). Ils ne sont pas conscients que la gestion des réserves fait partie d'un phénomène plus global. Nous verrons que, pour construire le concept de la régulation, les élèves doivent connaître les autres fonctions impliquées dans le phénomène de régulation et les liaisons qui existent entre elles.

Après apprentissage, un deuxième questionnaire est proposé aux élèves (annexe 2). Le changement remarqué dans les réponses des élèves nous permet de rendre compte de l'évolution des conceptions des élèves. Nous avons constaté que la conception de dépendance a été déstabilisée chez les apprenants, ce qui représente une condition indispensable pour construire le concept de régulation.

4 Canguilhem (1968) distingue quatre conceptions de la vie : la vie comme animation, la vie comme mécanisme, la vie comme organisation et la vie comme information.

5 La question était la suivante : pendant la nuit, l'individu jeûne pendant huit heures. Expliquez l'évolution du glucose sanguin pendant la nuit.

En raison de l'importance des schémas dans l'enseignement des phénomènes de régulation, nous nous sommes intéressées aux compétences des élèves liées à la schématisation, avant et après apprentissage. L'analyse des productions successives des élèves révèle l'évolution des compétences des élèves par rapport à la schématisation d'un modèle : faculté d'abstraction, fonction symbolique, coordination texte/schéma. Nous ne développerons pas davantage cet aspect dans ce texte.

• **L'analyse des débats**

L'analyse détaillée d'une séance de débat a été menée pour identifier comment les élèves parviennent à appliquer un modèle formel à un cas particulier. Ce type d'analyse est fondé sur l'idée que l'activité langagière des élèves, à travers les reconfigurations successives de leurs énoncés, renseigne sur leur activité cognitive et donc sur les processus en jeu dans l'élaboration du savoir.

Pour cette étude, nous nous sommes appuyées sur les travaux de Martinand et de Orange.

Pour Martinand (1994) la modélisation est une activité de mise en relation continue entre deux registres : « le registre du référent empirique » (RE) et « le registre des modèles » (RM).

Le registre du référent empirique : c'est le monde des objets et des phénomènes qu'on appelle la phénoménologie. Ce registre contient aussi les concepts, les modèles ou les théories déjà disponibles pour la description des phénomènes. Le référent empirique n'est pas donné, il est au contraire choisi. Il peut être choisi par le scientifique, le didacticien, l'enseignant, l'élève.

Le registre des modèles : c'est le registre de l'élaboration modélisante. Les modèles construits permettent d'expliquer la phénoménologie du référent empirique.

La relation établie entre les deux registres donne sens au modèle et lui permet de remplir ses fonctions.

Orange (1997), quant à lui, présente la modélisation comme une interaction entre trois niveaux : « le référent empirique », « le modèle » et « le paradigme explicatif ». Orange (1994) définit le paradigme explicatif comme le « monde mental » qui sous-tend le modèle et lui permet de remplir ses fonctions. Martinand propose de désigner par « matrice cognitive » l'ensemble des paradigmes épistémiques, des ressources théoriques et sémiotiques d'un modèle.

En nous référant à Walliser (1977), nous retiendrons le terme de « champ théorique » pour désigner les présupposés théoriques qui soutiennent le modèle. Ainsi, la modélisation revient, pour nous, à mettre en relation le registre empirique (RE) et le champ théorique (CT). Le modèle joue alors le rôle d'intermédiaire entre ces deux registres. L'analyse des débats, réalisée dans cette perspective, tend

à montrer comment les élèves tissent des liens entre les trois registres (RE, RM et CT), réalisant ainsi un véritable travail scientifique.

- **La construction du problème**

Bachelard (1938) insiste sur le fait que : « *Avant tout il faut savoir poser des problèmes* ». La construction de problème est la garantie de la scientificité d'une connaissance. La modélisation met en tension le registre empirique et le registre des modèles. La tension qui s'établit entre les deux registres crée un espace propice à la problématisation (Fabre & Orange, 1997). Il en résulte une organisation de la problématique dont la connaissance visée représente la solution. D'ailleurs, le problème définit les conditions de possibilité d'une solution ainsi que les contraintes à prendre en considération (Fabre, 1999). Nous pouvons décrire la problématisation comme une construction simultanée de contraintes empiriques et de nécessités au niveau des modèles. Orange⁶ insiste aussi sur l'aspect progressif et exploratoire de la construction des contraintes et des nécessités. Les différentes contraintes exprimées au cours d'un débat et les liens que fait apparaître l'analyse des propositions des élèves permet de construire « *l'espace des contraintes* » en jeu dans le débat.

Nous avons appliqué cette méthodologie afin de repérer le processus de construction du problème dans la phase de modélisation proposée aux élèves pour rendre compte de la régulation de la glycémie. Nous avons cherché dans les dialogues des élèves des indices permettant de mieux cerner la façon dont les élèves parviennent à articuler des éléments du registre empirique avec le registre des modèles.

2. La définition actuelle de la régulation glycémique

Soumis à des variations liées aux échanges avec le milieu extérieur (prises d'aliments, consommation liée à un exercice physique), le taux de glucose dans le sang est toutefois maintenu constant grâce à des mécanismes de régulation automatique.

2.1. Le modèle de référence

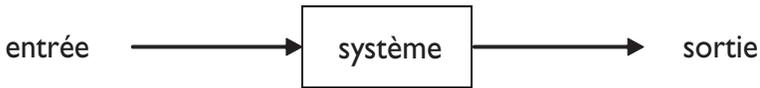
L'autonomie de l'organisme humain exige le maintien de la stabilité de son milieu intérieur (homéostasie) : il doit préserver la stabilité des concentrations des constituants physico-chimiques de ce milieu. La théorie des asservissements, qui représente un aspect de la théorie de la cybernétique, constitue un modèle intéressant pour étudier ces phénomènes.

6 Orange C., Beorchia F., Ducrocq P. & Orange D. (1999). Les auteurs expliquent qu'une contrainte empirique représente les données empiriques dont on veut rendre compte alors que les nécessités sont les conditions obligatoirement remplies par tout modèle lié au phénomène étudié.

Un système asservi est un système qui est sous l'influence de son environnement par certains processus appelés entrées (*inputs*). Le système exerce, lui aussi, une influence sur son environnement selon des processus appelés sorties (*outputs*).

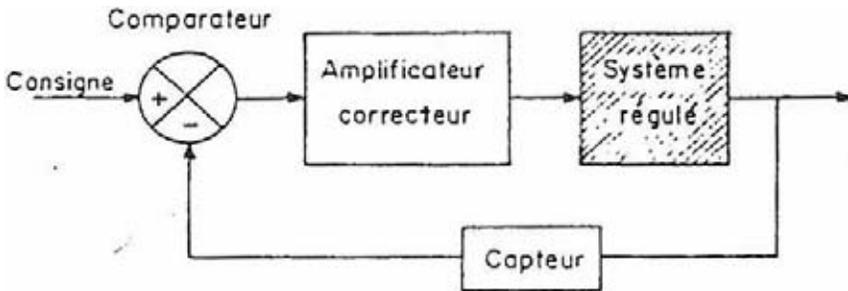
La grandeur de sortie est liée à la grandeur d'entrée dont elle doit suivre les variations comme l'illustre la figure 1.

Figure 1. Schéma d'un système asservi



Certains facteurs perturbent le fonctionnement du système considéré, les perturbations pouvant être d'origine interne ou externe et conduisent à un écart entre la variable d'entrée et la variable de sortie. Le système réagit selon un mécanisme de régulation qui permet d'amortir les perturbations que subit le système au cours de son fonctionnement. Il existe différents types de régulateurs ; dans le cas des régulateurs à rétroaction, l'existence d'une boucle de rétroaction permet de relier la variable d'entrée et la variable de sortie. Nous n'avons plus une chaîne ouverte comme dans la figure 1 mais une chaîne fermée dans laquelle interviennent plusieurs éléments (ou sous-systèmes) permettant la mesure de l'écart entre la variable d'entrée et la variable de sortie et la correction de cet écart afin de l'annuler (figure 2).

Figure 2. Schéma d'un système de régulation



Les sous-systèmes sont :

- un capteur, système d'observation qui transforme une grandeur physique, matérielle ou énergétique, liée à la variation de la variable de sortie en une grandeur informationnelle ;
- un comparateur, système qui détecte l'écart entre la variable de sortie et les variables de commande ;
- un effecteur ou correcteur, système de correction qui transforme une grandeur informationnelle en une grandeur physique et qui possède une fonction d'action ou d'exécution.

2.2. Le mécanisme de la régulation de la glycémie

Dans le cas de la régulation de la glycémie, qui est un mécanisme d'autorégulation, il s'agit de maintenir une valeur de référence ou de commande constante, cette valeur étant inscrite dans le patrimoine génétique de l'individu. Le glucose qui se trouve dans le milieu intérieur provient soit du milieu extérieur soit de la glycogénolyse (transformation du glycogène en glucose) soit de la néoglucogenèse à partir des lipides et des protéides.

L'utilisation du modèle cybernétique permet de décrire le milieu intérieur comme un système réglé, la glycémie étant la variable de sortie. Le régulateur comprend alors les éléments suivants :

- le capteur, support anatomique de cette fonction se trouve au niveau des cellules α et β du pancréas qui transforment les variations du taux de glucose en une grandeur informative exprimée par la modulation des sécrétions des hormones pancréatiques (insuline et glucagon) ;
- le comparateur, support anatomique de la fonction de comparaison, est situé au niveau du pancréas ;
- l'effecteur, système comprenant le foie, les muscles et le tissu adipeux. Ces tissus sont des producteurs et/ou des consommateurs de glucose. La modification de leurs activités corrige les perturbations de la glycémie.

Dans l'exemple que nous analysons, le professeur a choisi de présenter le modèle cybernétique aux élèves avant de leur faire utiliser pour expliquer le mécanisme de la régulation de la glycémie. Elle cherche ainsi à les familiariser avec un nouveau paradigme qui permet de concevoir le vivant comme un système composé d'éléments en interaction dynamique, l'organisation étant assurée grâce à l'information.

2.3 Légitimité épistémologique de ce modèle

La théorie cybernétique constitue un cadre théorique adéquat pour l'interprétation de la régulation et des concepts liés à ce phénomène, comme l'information et le rétrocontrôle. L'histoire des sciences (Poulain, 1996) nous informe sur les théories successivement adoptées pour expliquer le diabète : la théorie rénale de Galien, la théorie sanguine de Paracelse, la théorie gastrique de Bouchardat, la théorie hépatique de Claude Bernard et enfin la théorie pancréatique confirmée par la découverte du rôle endocrinien du pancréas. Chacune de ces théories désigne un organe dont le dysfonctionnement serait à l'origine des troubles constatés, attribuant ainsi la maladie à une cause unique. Cette façon de concevoir le fonctionnement de l'organisme a constitué un obstacle à la compréhension de la régulation de la glycémie et du diabète : les scientifiques⁷ n'ont pas soupçonné la possibilité d'une coordination entre la fonction du foie et celle du pancréas.

7 Cl. Bernard lui-même a remarqué, à deux reprises, la dégénérescence du pancréas lors d'autopsie d'un diabétique mais cela n'a pas attiré son attention.

Pendant des siècles, les médecins et les physiologistes ont adopté des théories à hypothèse unique, prônant ainsi une vision analytique jusqu'au début du xx^e siècle. L'application, à l'analyse du vivant, des modèles empruntés à la cybernétique donne la priorité aux interactions entre les différents organes, ce qui constitue une véritable révolution. La spécificité du modèle cybernétique repose sur plusieurs principes :

- il met l'accent non pas sur la constance du milieu intérieur mais sur les processus qui interviennent pour rétablir l'équilibre malgré l'existence de facteurs perturbateurs ;
- il introduit l'idée d'un transfert d'informations entre les éléments du système, informations qui vont contrôler le transfert de matière ;
- il propose un formalisme symbolique qui permet de matérialiser les différentes interactions existant entre les éléments d'un système de régulation et de définir leur fonction, en particulier la rétroaction.

Il en découle que l'apprentissage de la régulation de la glycémie, et plus généralement du concept de régulation, nécessite de se placer dans un registre explicatif compatible avec les principes énoncés ci-dessus. Il convient alors d'adopter une conception adéquate du vivant : « *la vie comme information* » (Canguilhem, 1968). Ainsi l'être vivant est défini comme un système ouvert qui réalise des échanges avec le milieu extérieur (échange d'information, de matière et d'énergie) et dont les différents éléments sont impliqués dans un réseau d'interactions.

3. Les situations d'apprentissage

Les situations d'apprentissage ont été réalisées dans les conditions scolaires ou « *écologiques* » avec le professeur de la classe. Les intentions de l'enseignante sont de présenter aux élèves le modèle cybernétique avant de leur faire analyser des données empiriques. Elle propose ainsi une approche systémique de l'étude de la régulation de la glycémie en demandant aux élèves à se référer à un modèle formel pour interpréter des phénomènes. Le dispositif d'apprentissage est organisé en cinq séances.

3.1. La première séance : l'introduction du modèle cybernétique

Cette séance de deux heures comporte trois phases. Dans un premier temps, le professeur propose un document destiné à définir la glycémie comme une variable réglée. Ensuite, elle introduit un modèle de régulation que les élèves devront représenter par un schéma.

• Un questionnement à propos de la variation glycémique journalière

Des courbes concernant les variations de la glycémie pendant la journée ont été distribuées aux élèves (cf. annexe 3). Les élèves analysent ces courbes et

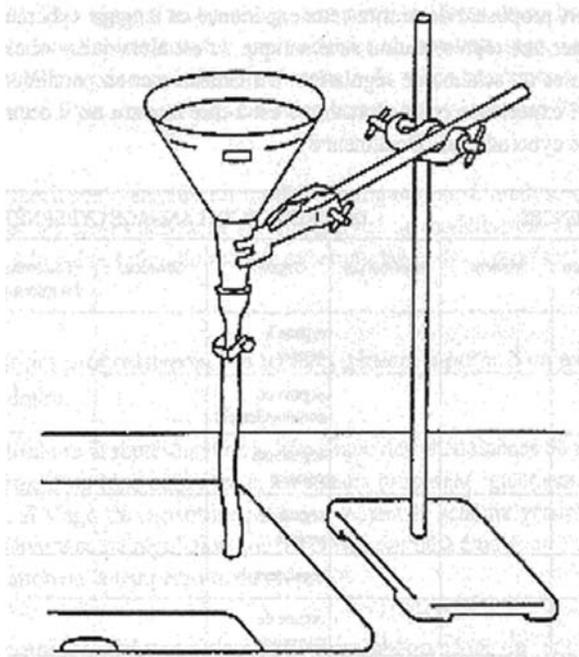
énoncent les questions que l'étude de ces courbes leur inspire. Après une mise en commun, chaque élève rédige un compte rendu.

• **Le modèle⁸**

Les élèves sont répartis en 5 groupes. Chaque groupe dispose du matériel présenté sur la figure 3, un entonnoir rempli d'eau relié à un tube flexible comprimé par une pince (utilisable comme robinet en la serrant plus ou moins à l'aide d'une vis), un bécher et une réserve d'eau.

Les élèves doivent s'organiser pour garder le niveau d'eau constant dans l'entonnoir après une perturbation (augmentation ou baisse du niveau d'eau dans l'entonnoir). Ils doivent respecter deux contraintes : chaque élève ne peut réaliser qu'une seule action et ne communique qu'avec un membre du groupe à l'exception de celui qui a fait l'action précédente.

Figure 3. Montage de l'expérience de la régulation du niveau de l'eau (Bayruber & Schaefer, 1978)



Le professeur aide les élèves à se répartir les tâches et les incite à réfléchir aux actions réalisées au cours de la manipulation. Sa méthode consiste à poser des questions aux élèves, par exemple : « *Qu'est ce que vous avez fait ? Qu'est ce que vous avez dit à votre camarade, précisément ? Que fait votre camarade ?* ».

8 Ce modèle est inspiré du modèle de Bayruber et Schaefer décrit par Schneeberger (1994). La manipulation permet, par la répartition des tâches, de matérialiser un système asservi.

• Travail de synthèse et de schématisation

Chaque groupe doit réaliser, sur une affiche, un schéma qui rend compte des activités physiques et intellectuelles réalisées au cours de cette expérience. Les affiches sont ensuite présentées devant la classe et une liste des opérations réalisées est établie (colonne de gauche du tableau I).

Le professeur indique alors la correspondance entre les éléments du dispositif utilisé et les composantes du modèle cybernétique (colonne de droite du tableau I).

Tableau I. Correspondance entre la régulation du niveau d'eau et le modèle cybernétique

Régulation du niveau d'eau	Correspondance	Modèle cybernétique
trait de référence	↔	valeur de référence
augmentation ou baisse du niveau de l'eau	↔	perturbation
observation du niveau final	↔	mise en jeu du capteur
comparaison avec le niveau initial	↔	mise en jeu du comparateur
communication de l'information	↔	transmission de l'information
réalisation de l'action (verser, enlever)	↔	mise en jeu de l'effecteur

La séance aboutit à deux questions : peut-on appliquer ce modèle au cas de la glycémie ? Dans le cas de la glycémie existe-t-il un capteur, un effecteur, un comparateur... ?

3.2. Deuxième séance : l'exploitation de données empiriques

• Première étape (une heure)

Au cours de la première heure de la séance, les élèves sont divisés en cinq groupes. Chacun dispose d'une série de documents⁹ qu'il doit étudier pour répondre aux questions suivantes : « existe-t-il, dans le cas de la glycémie, un comparateur, un capteur, un effecteur, une circulation d'information, une réserve ? » Nous signalons que les documents donnés aux élèves étaient différents d'un groupe à l'autre pour que chaque groupe étudie seulement un ou deux éléments de la régulation glycémique.

• Deuxième étape (une heure)

Les élèves constituent de nouveaux groupes qui doivent être composés d'au moins un élève de chacun des premiers groupes. De cette façon, chaque groupe a la possibilité de discuter de tous les documents proposés par le professeur. Chaque élève a pour mission d'expliquer à ses camarades les analyses des documents effectuées pendant la première heure. L'enseignant stimule les débats des élèves et les pousse à expliciter leurs arguments pendant les discussions.

⁹ Il s'agit de documents présentant des observations cliniques et des résultats expérimentaux portant sur le rôle des différents organes (foie, pancréas, tissu musculaire, tissu adipeux) intervenant dans la régulation de la glycémie et sur les hormones régulatrices. Ces documents sont extraits de manuels de première scientifique.

À la fin de la séance, chaque élève doit produire un compte-rendu individuel faisant la synthèse de l'étude de tous les documents, sous forme d'un schéma ou d'un texte.

• **Troisième séance : l'importance de l'homéostasie**

Le professeur reprend, sous la forme d'un cours, le travail effectué par les élèves pendant la deuxième séance. Elle propose ensuite l'étude d'un texte de Claude Bernard¹⁰ pour introduire le concept de milieu intérieur que les élèves abordent pour la première fois. Cela lui permet de présenter la constance du milieu intérieur comme une nécessité pour la survie des cellules et par conséquent de l'organisme. Elle illustre cette idée en présentant les conséquences de l'hyper- et de l'hypoglycémie.

Le cours du professeur traite ensuite des mécanismes de la régulation de la glycémie : stockage et déstockage de glucose (au niveau du foie et du muscle), sensibilité du pancréas au glucose, hormones régulatrices.

• **Quatrième séance : réalisation d'un schéma de régulation**

Quatre schémas construits par les élèves au cours de la deuxième séance ont été choisis et sont soumis à des discussions en groupe (la classe a été divisée en 5 groupes). Les élèves produisent un tableau expliquant les points négatifs et positifs de chaque schéma. Le professeur présente ensuite les cinq tableaux et encourage les élèves à débattre du contenu de ces tableaux.

Le professeur demande aux élèves de réaliser individuellement un nouveau schéma qui explique la régulation du taux du glucose dans le sang.

• **Cinquième séance : étude du diabète**

Dans une première phase, le professeur propose aux élèves d'analyser trois schémas extraits de manuels et de les comparer à un schéma du modèle cybernétique.

Dans une deuxième phase, les élèves ont étudié le diabète pour chercher les causes possibles de cette maladie en prenant en considération le modèle construit. Trois hypothèses ont été émises : un dysfonctionnement du capteur, un dysfonctionnement des effecteurs, un problème lié aux hormones régulatrices. Ils ont utilisé des documents du manuel (observation d'un pancréas de diabétique, comparaison des consommations du glucose par une personne diabétique et une personne non diabétique) pour tester leurs hypothèses avant d'étudier les causes héréditaires du diabète.

¹⁰ Extrait des *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, 1878-1879.

4. Analyse d'un débat

Durant la deuxième séance, les débats des différents groupes ont été enregistrés. Pour différentes raisons (qualité de l'enregistrement, nature des interventions des élèves...), nous avons choisi de présenter ici l'analyse du débat au sein d'un des groupes.

4.1. Passer du modèle analogique à un modèle formel

Les élèves commencent par prendre connaissance des documents en cherchant à répondre à la question posée, qui elle-même renvoie à un modèle formel (le modèle cybernétique) défini lors la précédente séance.

- 26 – Camille : *C'est des perturbateurs/des perturbateurs parce que ça a changé le...*
 27 – Cécile : *Ça explique après.*
 28 – Benoît : *Ah ! oui/ça a rien changé de tout.*
 29 – Camille : *Ben si ! ça// ça a rien augmenté la taille.*
 30 – Benoît : *Ça ne perturbe rien de tout/ça augmenté la taille.*
 31 – Cécile : *Voilà ! Si c'est la glycémie/c'est peut être que ça augmente dans le sang.*
 32 – Camille : *Voilà ! la concentration a augmenté.*
 33 – Cécile : *Donc perturbateur.*
 34 – Camille : *Voilà ce que disent eux.*
 35 – Cécile : *Oui.*
 36 – Camille : *On s'en fout ou on passe aux comparateurs de valeurs.*

Les élèves passent ainsi d'un document à l'autre sans parvenir à identifier la fonction représentée par chaque document. Pour sortir de cette impasse, ils redéfinissent les différentes fonctions, en se référant au modèle de la régulation du niveau d'eau.

- 58 – Virginie : *Dans notre groupe c'était/hum/Aurélie/Aurélie/elle était quoi ?*
 59 – Camille : *Aurélie/Heu...*
 60 – Benoît : *Partout/Tu disais que tu ouvrais le robinet... heu.*
 61 – Camille : *C'est elle qui ouvrait le robinet.*

Dans ces échanges, la fonction est liée à la personne qui a effectué une action définie lors de l'expérience de maintien du niveau de l'eau. Au cours du débat, ils ont ainsi tendance à personnifier les éléments de la régulation.

- 229 – Cécile : *Non l'effecteur c'était// c'était ben c'était Benoît/*

Cependant, dans d'autres passages de débat, certaines interventions ne lient plus les fonctions aux personnes qui les ont concrétisées même s'ils continuent à personnifier les éléments de la régulation.

77 – Camille : *Voilà/lui il voit tandis que l'autre il fait une comparaison/*

78 – Cécile : *Tu vois/le comparateur c'est le cerveau du groupe/*

79 – Virginie : *Et l'effecteur/*

80 – Virginie : *L'effecteur c'est celui qui fait les actions/*

Les élèves décortiquent ainsi le modèle et essaient de comprendre le sens, les limites et l'extension de chaque fonction de la régulation. Cécile identifie le comparateur au cerveau du groupe, ce qui renvoie à l'idée d'un contrôle des interactions existantes entre les éléments de la régulation. Ce point n'a pas été discuté dans la classe, ce qui signifie que c'est une initiative de Cécile qui introduit une nouvelle fonction (l'intégration).

Dans ce débat, les élèves se sont focalisés sur l'identification des différents éléments du système sans trop s'intéresser aux relations entre eux. Cependant, nous avons repéré quelques interventions portant sur les interactions entre les fonctions de la régulation, par exemple Virginie a beaucoup insisté sur la nécessité d'une relation entre la réserve et l'effecteur : « *Mais c'est parce que l'effecteur avait besoin de la réserve* » (177).

Cette élève a répété trois fois cette proposition ; elle évoque la situation de la régulation du niveau d'eau mais elle n'arrive pas à attirer l'attention de ses camarades sur ce point : « *Parce qu'en fait la réserve ça va avec l'effecteur parce que l'effecteur pour/heu/pour stabiliser l'eau il avait besoin de réserve* » (188).

4.2. Explorer différentes pistes

Un des documents étudiés représente les résultats d'une expérience similaire à celle réalisée par Claude Bernard, qui lui a permis de montrer que le foie produit du glucose¹¹. Il comporte un schéma représentant la vascularisation du foie et un tableau qui indique le taux de glucose dans la veine porte- et la veine sus-hépatique dans différentes conditions (à jeûn, après une absorption de glucose). Au début de l'exploitation de ce document, les élèves proposent plusieurs interprétations, ce qui les oblige à préciser la signification de chaque fonction du système de régulation et donc à établir des relations entre les données empiriques et le modèle. Le tableau 2 présente l'évolution du contenu des échanges entre élèves au cours de quelques tours de parole.

¹¹ C'est la fameuse expérience du « foie lavé ».

Tableau 2. Évolution du contenu des échanges au cours du débat (97-114)

Énoncés des élèves	Évolution
97 – Cécile : <i>Non//l'intestin c'est l'effecteur.</i> 98 – Camille : <i>Non/leuh non.</i> 99 – Cécile : <i>Puisque c'est lui qui fait augmenter...</i> 100 – Virginie : <i>L'intestin c'est la réserve.</i> 101 – Camille : <i>Ouil/c'est la réserve.</i> 102 – Benoît : <i>Mais non !</i> 103 – Camille : <i>Non//l'intestin je ne crois pas.</i> 104 – Benoît : <i>L'intestin c'est par là ou arrivent les aliments extérieurs/c'est l'effecteur/c'est lui qui augmente// augmente// le taux de glucose.</i> 105 – Virginie : <i>Non//l'effecteur// (R)// je ne suis pas sûr (R).</i>	Les élèves tentent de mettre en relation les données empiriques avec le registre des modèles ce qui les conduit à attribuer à l'intestin des fonctions différentes (<i>effecteur, réserve, perturbateur</i>)
106 – Alexis : <i>Le perturbateur/c'est toujours d'ingérer ou de pas ingérer/leuh !...</i> 107 – Camille : <i>Ouil/c'est vrai.</i> 108 – Cécile : <i>Oui le perturbateur/c'est le repas et Euh...</i> 109 – Alexis : <i>Et le sport/donc après ça va dans l'intestin.</i>	Les élèves redéfinissent les éléments du modèle en le faisant fonctionner sur l'exemple donné. Ils élargissent le registre, ainsi redéfini, avec une autre situation.
110 – Camille : <i>Mais le foie c'est bizarre// ah ! c'est-à-dire que la veine sus-hépatique il y en a et il y en a pas c'est-à-dire qu'il y en est resté dans le foie.</i> 111 – Virginie : <i>Ouil/c'est la réserve.</i> 112 – Camille : <i>C'est-à-dire que c'est la réserve.</i> 113 – Benoît : <i>Voilà !</i> 114 – Camille : <i>On peut mettre réserve.</i>	Les élèves reprennent l'analyse du document et sélectionnent des éléments permettant d'attribuer une fonction au foie, en se référant au registre des modèles.

Apparemment, les élèves parviennent à trouver une donnée empirique pertinente par rapport au modèle (intervention 110 de Camille qui reprend une proposition de Virginie en 94). Il s'agit de la variation de la concentration du glucose entrant et sortant du foie. Les élèves passent ensuite à l'analyse d'un autre document.

Cet épisode de co-construction débouche sur un accord apparent mais, pour autant, le rôle de réserve du foie ne sera véritablement admis que lorsque les élèves auront compris la signification des variations du taux de glycogène dans le foie. Les élèves vont revenir plus tard sur ce sujet en apportant d'autres arguments.

Ce type d'échange, qui peut paraître à première vue oiseux, revient souvent dans le débat. C'est l'occasion pour les élèves d'essayer des pistes différentes pour retenir celles qui paraissent les plus pertinentes. C'est donc un faisceau convergent d'arguments qui vient confirmer la validité d'une hypothèse.

L'activité langagière témoigne ainsi de leur tentative de s'inscrire dans une démarche scientifique en construisant progressivement des preuves.

4.3. Amorcer la construction de l'espace-problème

Le débat est propice à la mise en place d'un espace de négociations permettant aux interactants d'élaborer du sens en effectuant de nouvelles mises en relation. Nous désignerons par espace-problème cet espace commun de significations, lorsqu'il devient le théâtre de la construction d'un problème. L'analyse du débat

permet d'identifier des éléments qui participent de la construction d'un espace-problème.

Parmi les documents présentés aux élèves, il y a deux images de cellules hépatiques observées au microscope électronique, la première prise avant un repas et la seconde après un repas. On peut observer sur ces photos une augmentation de la taille des granules de glycogène dans une cellule hépatique après un repas. La constatation de ces différences n'était pas flagrante pour les élèves. Ceci est peut-être dû aux difficultés de lecture des images scientifiques. Malgré cela, Benoît énonce, après une courte discussion, que la différence entre les deux photos est la taille des granules de glycogène. Après s'être mis d'accord sur cette observation, les élèves du groupe doivent interpréter cette donnée empirique en utilisant le modèle. Cécile relie le changement de taille des granules de glycogène à l'augmentation du taux de glucose dans le sang.

30 – Benoît : *Ça ne perturbe rien du tout, ça a augmenté la taille/*

31 – Cécile : *Voilà/si c'est la glycémie c'est peut être que ça augmenté dans le sang/*

32 – Camille : *Voilà/la concentration a augmenté//*

La variation du taux de glucose dans le sang est une donnée empirique déduite à partir d'une courbe étudiée au cours de la première séance. Cette donnée est avancée sans pour autant que le lien avec l'augmentation de la taille des granules soit compris. Puis le sujet est momentanément abandonné et ne sera repris (par Benoît) que plus tard, une fois élucidée le rôle du foie.

Nous avons vu (dans le tableau 2) qu'avec un document présentant des résultats similaires à ceux obtenus par Claude Bernard les élèves ont pu avancer l'idée que le foie doit jouer le rôle de réserve. La comparaison entre le taux du glucose entrant et sortant du foie a permis aux élèves de construire la nécessité de la rétention du glucose par le foie. En mettant en tension le registre empirique et le registre des modèles, Virginie a établi l'existence d'une réserve de glucose dans le foie, réserve mobilisable dans la régulation de la glycémie.

Le troisième document étudié représente la réaction glucose/glycogène. Une fois la nature et la localisation de glycogène connue, Cécile peut conclure en I61 : « *En fait le contenant de la réserve c'est le foie et le contenu de la réserve c'est le glycogène* ». Les élèves comprennent que le rôle de réserve du foie est lié à la possibilité d'obtenir du glucose à partir du glycogène. Cette donnée qui prend le statut d'une contrainte empirique permet la construction de la nécessité d'une fonction de déstockage ou de production de glucose.

152 – Cécile : *Il doit avoir une fonction/le glycogène hein/*

153 – Benoît : *Faire du glucose/*

(...)

155 – Virginie : *Mais c'est la synthèse/ben oui c'est la réserve// grâce à ça on peut faire de nouveau du glucose en fait (...)*

Ainsi ce groupe d'élèves a partiellement défini la fonction de correction ou d'effecteur qui consiste, dans le cas de la glycémie, en une action sur les réserves de glucose du foie. Benoît complète cette idée en mettant en évidence la nécessité d'un stockage par une reprise de l'observation de départ.

252 – Benoît : *Un repas mais ça grossit/mais parce qu'il y a plus de glucose donc les réserves elles grossissent/*

(..)

278 – Benoît : *Alors/vous avez compris comment ça marche là/à quoi ça servait/pourquoi ça grossit/*

Les interventions de Benoît montrent qu'il applique un élément du modèle (la mise en réserve) à la régulation du taux de glucose. L'augmentation de taille des granules de glycogène dans les cellules hépatiques est une contrainte empirique et Benoît met cette contrainte en relation avec le présupposé théorique de l'existence d'une réserve de glucose. La nécessité d'un stockage du glucose après une augmentation de la glycémie se dégage de cette mise en relation. Ainsi, l'interprétation du premier document n'acquiert une signification, pour le groupe, qu'après une longue suite d'échanges faisant intervenir les deux registres RE et RM.

5. Discussion

Dans cet exemple, à la différence des recherches concernant la problématisation réalisées par Fabre et Orange, nous abordons la construction du problème avec des élèves qui connaissent déjà un modèle théorique. En essayant d'appliquer le modèle préalablement établi, les élèves mettent en interaction le registre empirique et le registre des modèles. Tout au long du débat, nous avons, en effet, remarqué des va-et-vient entre les deux registres. L'exploitation des documents a constitué une occasion pour les élèves d'améliorer leur compréhension du modèle cybernétique. De même, une connaissance plus approfondie du modèle cybernétique a représenté une condition nécessaire à la construction du registre empirique.

Si nous adoptons la définition de Orange *et al.* (1999, p.108) qui présente la problématisation comme une construction conjointe de contraintes empiriques et de nécessités des modèles, nous pouvons conclure que, dans cet exemple, les élèves ont pu mettre en jeu un espace-problème concernant la réserve et l'effecteur dans le cas de la régulation de la glycémie. Les élèves ont identifié plusieurs contraintes empiriques à partir desquelles ils ont pu construire des nécessités au niveau du modèle.

Du point de vue de la problématisation, ce débat a donné l'occasion d'insister sur certaines contraintes du modèle comme la nécessité d'une relation entre l'effecteur et la réserve. Cette contrainte en évoque une autre plus globale, celle

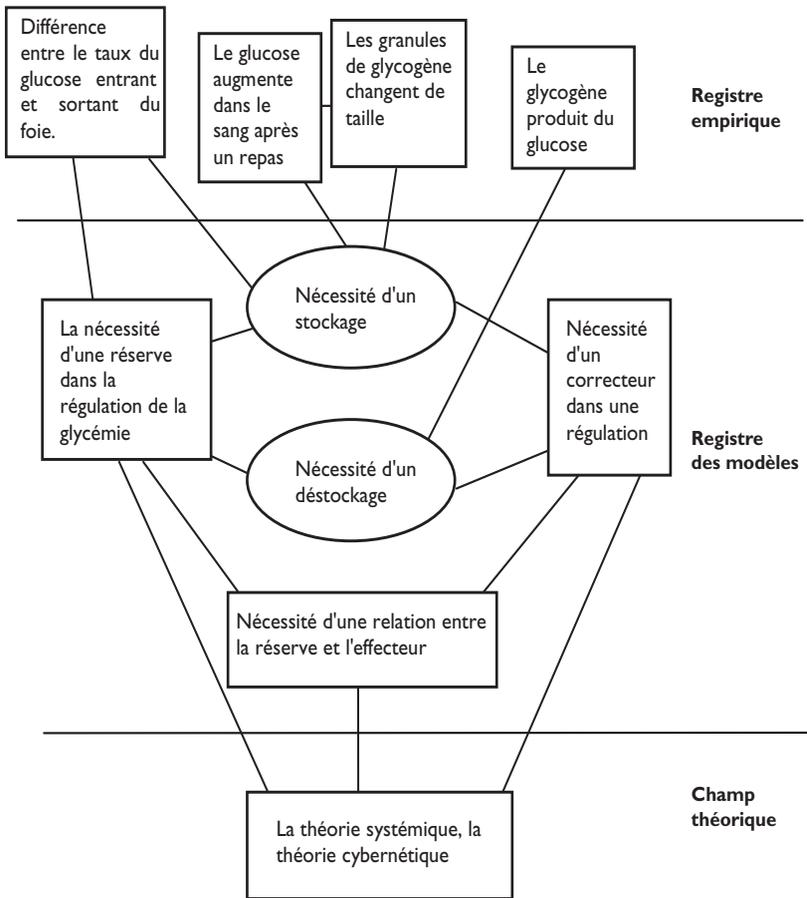
d'interactions nécessaires entre les différentes parties d'un système de régulation. De plus, ce débat a donné la possibilité aux élèves de préciser d'autres nécessités comme la fonction de correction ou d'effecteur qui se manifeste dans la régulation de la glycémie par des actions de stockage et de déstockage de glycogène dans le foie. Nous devons mentionner que dans les deux cas de régulation (niveau de l'eau et glycémie), la correction du taux se fait par action sur les réserves et donc par un transport de matière, ce qui a peut-être facilité la tâche des élèves. S'ils devaient étudier un autre phénomène comme la régulation de la température interne, la fonction d'effecteur se manifesterait d'une autre façon (en faisant intervenir un transport d'énergie). Ainsi certaines nécessités du modèle cybernétique pourraient être révisées selon le type de régulation étudié. Nous pouvons aussi voir se révéler de nouvelles nécessités que ne prend pas en compte le modèle cybernétique comme celles liées au milieu intérieur. En physiologie, la nécessité de la préservation de l'équilibre du milieu intérieur est plus globale et plus fondamentale que la nécessité du maintien d'une valeur de référence. La notion du milieu intérieur est capitale pour penser la régulation en physiologie (Schneeberger, 1992 ; Orange, 1997).

À travers les activités proposées par l'enseignant, les élèves ont eu l'occasion de faire fonctionner un modèle imposé dans le but de leur donner une référence commune. Ainsi l'interprétation des documents permettait de dégager des contraintes empiriques dont la pertinence a pu être interrogée à la lumière des nécessités sur le modèle précédemment établies. Par ailleurs, le professeur a imposé un travail de groupes organisé de telle façon que les élèves devaient construire une argumentation valide, susceptible de convaincre les élèves des autres groupes. Cette tâche n'est pas aisée pour les élèves et elle passe parfois par des phases de tâtonnement. Nous avons ainsi remarqué que le groupe citait plusieurs cas possibles de mise en relation entre les deux registres avant d'arriver à construire une relation pertinente. Cette activité n'a pas été accompagnée de conflits entre les élèves ; elle s'est basée au contraire sur la coopération. Il n'est cependant pas possible d'affirmer que les élèves sont arrivés au même niveau de construction du problème.

Les relations établies par les cinq élèves du groupe à l'issue du débat peuvent être représentées par l'espace de contraintes de la figure 4.

Cet exemple montre comment un groupe d'élèves parvient à s'approprier un modèle et à le faire fonctionner pour construire des explications nouvelles. Il ne montre pas pour autant qu'en faisant ce travail, les élèves renoncent à leurs représentations premières sur le fonctionnement de l'organisme. Cependant, il permet d'amorcer un changement dans leur façon de penser les phénomènes de régulation et ainsi de leur donner des outils intellectuels plus performants pour aborder l'étude des cas pathologiques comme le diabète.

Figure 4. Espace de contraintes représentant les points problématisants mis en jeu par un groupe d'élève de première S



6. Conclusion

L'étude de la régulation de la glycémie, inscrite au programme de lycée (en France et en Tunisie), exige le recours au modèle cybernétique, qui constitue le modèle de référence pour expliquer les phénomènes de régulation.

Dans le cas étudié, le professeur a choisi d'introduire ce modèle formel à partir d'un modèle analogique (la régulation du niveau de l'eau dans un récipient). Les observations réalisées ont montré que les élèves sont capables, d'une part, d'appréhender correctement le modèle cybernétique et, d'autre part, de le faire fonctionner dans le cas de la régulation de la glycémie.

En faisant l'expérience d'une vision systémique du vivant, ils sont amenés à prendre conscience des limites de leurs conceptions premières, le plus souvent

animistes ou vitalistes. Tous les élèves de cette classe n'ont pas pour autant réussi à s'approprier ce modèle du vivant comme en témoigne leur difficulté à analyser une situation nouvelle (posttest) en faisant appel au concept de rétrocontrôle.

L'analyse du débat entre les élèves lors des activités de modélisation révèle la construction par les élèves d'un ensemble de points problématisants (figure 4) concernant le phénomène de régulation. Nous pensons que les activités de modélisation ont favorisé la problématisation, processus indispensable à la construction d'un savoir scientifique. En effet, une connaissance questionnée est une connaissance qui s'oppose à l'opinion (Bachelard, 1938) et à la connaissance commune. Ces activités de modélisation sont liées à des échanges entre pairs, organisés dans des dispositifs contrôlés par l'enseignant. Cet exemple montre la nécessité d'accorder aux élèves le temps nécessaire pour construire eux-mêmes des explications à partir des outils intellectuels mis à leur disposition. De telles études montrent l'intérêt, mais également les limites, de situations d'enseignement-apprentissage laissant une place aux débats scientifiques.

D'autres études doivent être conduites en Tunisie pour préciser ce qui peut aider les élèves à construire des connaissances problématisées proches des connaissances scientifiques, contrairement aux conceptions antérieures des élèves. ■

REMERCIEMENTS

Tous nos remerciements à Marcelle Goix, professeur de SVT au lycée Pape-Clément de Pessac, qui a accepté d'ouvrir sa classe et qui a facilité la conduite des observations.

BIBLIOGRAPHIE

- BACHELARD G. (1938). *La formation de l'esprit scientifique*. Paris : Vrin.
- BAKHTINE M. (1984). *Esthétique de la création verbale*. Paris : Gallimard.
- BAYRUBER H. & SCHAEFER G. (1978). *Kybernetische Biologie*. Kiel : IPN.
- BERNARD C. (1878-1879). *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*. Paris : Baillière.
- CANGUILHEM G. (1968). Vie. In *Encyclopaedia Universalis*.
- CANGUILHEM G. (1996). La régulation. In *Encyclopaedia Universalis*.
- DOUAIRE J. (Coord.) (2004). *Argumentation et discipline scolaire*. Paris : INRP.
- FABRE M. & ORANGE C. (1997). Construction de problèmes et franchissements d'obstacle. *Aster*, n° 24, p. 37-57.

- FABRE M. (1999). *Situations-problèmes et savoir scolaire*. Paris : PUF.
- JACOB F. (1970). *La logique du vivant*. Paris : Gallimard.
- JEBBARI S. (1994). *Schéma et schématisation : étude de quelques difficultés des élèves en biologie*. Thèse de doctorat en didactique des sciences, université Denis-Diderot–Paris 7, Paris.
- MARTINAND J.-L. (1994). Quels enseignements peut-on titrer des travaux dans la perspective du développement de curriculum ? In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 115-125.
- ORANGE C. (1994). Les modèles de la mise en relation au fonctionnement. In J.-L. Martinand (dir.). *Nouveaux regards sur l'enseignement et l'apprentissage de la modélisation en sciences*. Paris : INRP, p. 25-43.
- ORANGE C. (1997). *Problèmes et modélisation en biologie*. Paris : PUF.
- ORANGE C., BEORCHIA F., DUCROCQ P. & ORANGE, D. (1999). « Réel du terrain », « Réel de Laboratoire » et construction de problèmes en sciences de la vie et de la Terre. *Aster*, n° 28, p. 107-129.
- POULAIN N. (1996). *Histoire du diabète sucré : des origines à la découverte de l'insuline*. Thèse de doctorat, université Henri-Poincaré–Nancy I, Nancy.
- RUMELHARD G. (dir.) (1994). *La régulation en biologie, approche didactique : représentation, conceptualisation, modélisation*. Paris : INRP.
- SCHNEEBERGER P. (1992). *Problèmes et difficultés dans l'enseignement d'un concept transversal : le concept de la régulation*. Thèse de doctorat en didactique des sciences, université Denis-Diderot–Paris 7, Paris.
- SCHNEEBERGER P. (1994). Place des modèles dans l'enseignement du concept de régulation. In G. Rumelhard (dir.). *La régulation en biologie, approche didactique : représentation, conceptualisation, modélisation*. Paris : INRP, p. 131-164.
- WALLISER B. (1977). *Systèmes et modèles : introduction critique à l'analyse des systèmes*. Paris : Éd. du Seuil.

ANNEXE I. Le prétest

Question 1 :

Qu'est-ce qui se passe quand on donne du sucre à une personne évanouie ? Expliquez le phénomène par un texte et un schéma.

Question 2 :

Après un repas, le taux de glucose peut atteindre 1,2 gramme par litre.

Après une activité sportive, le taux de glucose dans le sang peut s'abaisser jusqu'à 0,6 gramme par litre.

Et pourtant le corps humain garde la concentration du glucose dans le sang très proche de la valeur 1 gramme par litre.

Comment le corps fonctionne pour maintenir cette valeur constante ?

Question 3 :

Pendant la nuit, l'organisme jeûne pendant huit heures.

Expliquez (sous forme de texte et de dessin) l'évolution de la glycémie pendant la nuit.

Question 4 :

Si vous deviez expliquer à un camarade : « Qu'est ce que le diabète ? », que diriez-vous ?

Question 5 :

Classez les causes possibles du diabète de 1 à 5

Avoir un parent diabétique
Les sucreries
L'obésité
Le stress
L'état psychologique

Argumentez vos choix.

Quelles sont les sources de vos informations ?

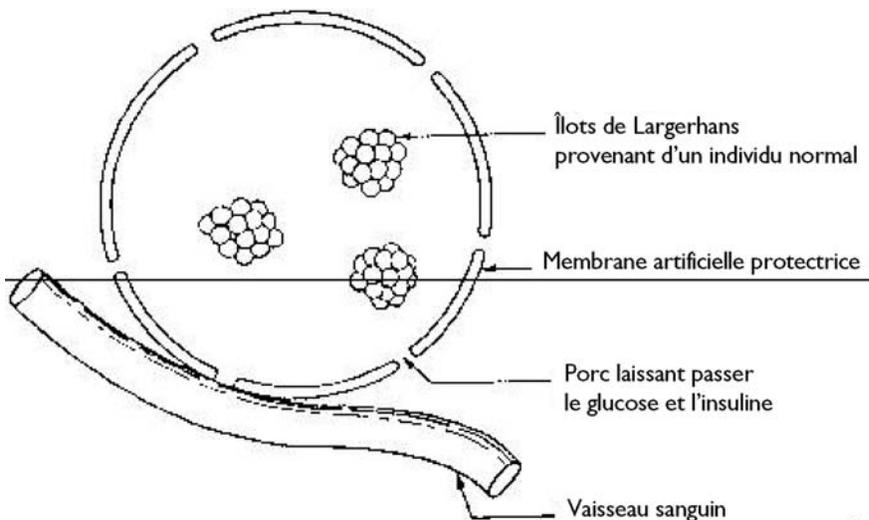
Question 6 :

À quelle(s) questions voudriez-vous que le cours réponde ?

ANNEXE 2. Le posttest

Question 1 :

Le diabète insulino-dépendant se caractérise par l'incapacité qu'a le pancréas de sécréter l'insuline. Cette maladie se traite par des injections répétées d'insuline. Un nouveau traitement actuellement à l'étude est la greffe d'un pancréas bio-artificiel dont le principe est présenté sur le document. Des îlots de Langerhans d'un individu normal sont déposés à l'intérieur d'une capsule formée par une membrane artificielle perméable au glucose et à l'insuline mais pas aux cellules responsables de rejet de greffe. La capsule greffée au contact d'un vaisseau sanguin assure un traitement efficace de la maladie pendant plusieurs années.



Expliquez pourquoi le pancréas bio-artificiel assure une meilleure régulation de la glycémie que l'injection répétée d'insuline.

Accompagnez votre explication de deux schémas qui rendent compte des deux situations proposées.

Question 2 :

Au repos, un animal privé d'hypophyse, de pancréas, de glandes surrénales, recevant une alimentation appropriée et maintenu dans une atmosphère à la neutralité thermique, présente une glycémie constante. Il existe une régulation élémentaire.

Pour une faible demande énergétique, la glycémie est réglée par la vitesse d'utilisation du glucose.

Ces données sont-elles en accord avec ce que vous avez étudié en cours ? Argumentez votre réponse. Que pouvez-vous conclure ?

ANNEXE 3. Variation de la concentration du sang en glucose (glycémie) chez trois individus de phénotype normal (© Hatier)

