

Identification et classification des difficultés d'élèves de seconde sur l'information génétique

CHAPEL Gwenda-Ella, Laboratoire d'Informatique de Grenoble – Equipe MeTAH, gwendael.chapel@imag.fr

MARZIN Patricia, Laboratoire d'Informatique de Grenoble – Equipe MeTAH

Mots clés : Information génétique, Modification, Difficultés des élèves

Résumé

L'information génétique est une notion qui pose problème aux élèves de lycée aussi nous nous proposons d'identifier et de classer les difficultés des élèves sur ce sujet. Pour cette analyse, nous avons proposé aux élèves de modifier l'information génétique d'un organisme vivant, qui permet d'étudier à la fois, comme nous le souhaitons, la structure et la fonction de l'information génétique. Après avoir effectué une étude bibliographique et une analyse du savoir, nous avons cherché à vérifier l'existence de six niveaux biologiques dans les productions des élèves.

Introduction

L'information génétique est une notion qui pose problème aux élèves lors de son enseignement en classe de seconde, aussi bien pour la compréhension de sa structure sous forme d'ADN (organisation des nucléotides, phosphates et sucres en double hélice) que de sa fonction (détermination du phénotype d'un individu à partir de son expression organisée sous une forme codée). La compréhension des mécanismes à l'origine des modifications de l'information génétique a l'avantage d'aborder ces deux points. En effet, les modifications de l'information génétique provoquent une modification de la structure de l'ADN et donc une modification du code génétique qui va se traduire, par exemple, par des changements physiologiques au niveau de l'organisme. Pour étudier les difficultés des élèves concernant la structure et la fonction de l'information génétique, nous analyserons leurs productions écrites sur la localisation d'une modification de cette information. Cette recherche, en cours, a pour but final, de construire une situation permettant de diagnostiquer les conceptions des élèves sur l'information génétique. Cette situation sera mise en place lors de séances de travaux pratiques, fera intervenir la conception de protocoles expérimentaux (Chapel, 2008) et sera étayée par un Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain (EIAH).

Contexte bibliographique

La génétique est un vaste domaine disciplinaire. Elle est née du besoin de différencier la

science de la reproduction (l'embryologie) de la science de l'hérédité qui va devenir la génétique. Cette science, fondée sur une entité théorique : le gène, traite tout autant de l'étude des lignées et des populations, de la génétique de Mendel que de la génétique moléculaire, plus proche de la biochimie et qui s'intéresse à la nature et au fonctionnement des gènes et de leurs dérivés comme l'information génétique (Morange, 2004).

L'étendue de ce champ disciplinaire fait que son étude dans les programmes scolaires français s'étale de la sixième à la terminale. On y retrouve successivement : l'étude des cellules reproductrices et la transmission de la vie, la méiose et la mitose, les chromosomes, les notions de gènes et d'allèles, la structure de l'ADN, les mutations, la transcription, la traduction et les croisements génétiques.

En classe de seconde, l'enseignement de la génétique consiste en une description de l'information génétique portée par l'ADN et formée de 4 bases organisées par paires et reliées par des phosphates et des sucres. L'enseignement de cette structure a pour objectif l'apprentissage des notions de code génétique et de mutations. Le lien entre ADN et code génétique est présenté, alors que le lien entre ADN et mutation est plus implicite. En effet, les élèves étudient les conséquences des mutations au niveau de la structure de la molécule puis au niveau phénotypique mais sans aborder le passage par la synthèse protéique.

L'information génétique est organisée sous forme d'ADN et son expression détermine les caractères d'un organisme vivant. L'étude de la construction historique du concept d'ADN met en évidence plusieurs obstacles épistémologiques. Le premier est la condensation-décondensation de la chromatine lors de multiplication cellulaire. Les questions sous-jacentes sont : comment l'entité qui porte l'ensemble de l'information définissant génétiquement un individu peut-elle changer de forme ? Pourquoi n'est-elle pas constante ?

Le deuxième obstacle majeur porte sur la notion de code et l'organisation de ce code. Le message porté par l'information génétique est porté par l'ADN sous forme codée. Plusieurs étapes sont nécessaires pour découvrir le caractère porté par l'organisme à partir de l'information génétique. On peut alors se demander pourquoi ce caractère n'est-il pas lisible directement ?

Le dernier obstacle concerne les relations entre les objets impliqués dans la transmission des caractères : ADN-gène-chromosome-caryotype. Quelles sont les articulations entre ces différentes organisations biologiques et quel est le rôle de chacune dans la transmission de l'hérédité ? L'ensemble de ces obstacles à l'apprentissage de la notion d'information génétique peuvent apparaître si l'on essaye de répondre à la question suivante : Comment passe-t-on d'une séquence de nucléotides à un phénotype ? C'est justement à l'un de ce problème que tente de répondre l'enseignement de la génétique au lycée.

Ce vaste domaine de la génétique et plus particulièrement la notion d'information génétique est source de difficultés pour les élèves lors de l'apprentissage, comme le montre l'ensemble de la littérature que nous avons étudié en préalable à notre étude expérimentale.

Le domaine de la génétique est difficile pour les élèves

Les difficultés des élèves lors de l'apprentissage de la génétique ont fait l'objet de plusieurs études menées ces 30 dernières années auprès d'élèves de la même tranche d'âge (16-19 ans). Johnstone (1980) et Bahar (1999) ont cherché à connaître les sujets perçus comme les plus difficiles par les élèves anglais et écossais. Ces recherches, menées auprès de 166 élèves en fin de lycée, 167 étudiants en première année d'université (filiale biologie) et 50 enseignants, ont permis à Johnstone de classer des thèmes (« topics ») de la biologie, du plus difficile (1) au moins difficile (15). Il a constaté que la génétique était classée 3^e par les élèves et les

étudiants et 5^e par les enseignants.

Bahar, qui a mené son étude auprès de 207 étudiants écossais en biologie, a voulu spécifier les domaines posant des difficultés en détaillant la liste des thèmes (passage de 15 à 36 items). Il a ainsi constaté que parmi les 10 thèmes classés comme étant les plus difficiles, 6 concernent la génétique : « Monohybrid and dihybrid crosses and linkages (1), Genetic engineering (2), Genetic control of development and metabolic processes (3), Meiosis (4), Gametes, alleles and genes (6), Mutation (10) » [Croisements mono et dihybrides (1), Génie génétique (2), Contrôle génétique du développement et processus métaboliques (3), Méiose (4), Gamètes, allèles et gènes (6), Mutation (10)]. Ces études montrent que la génétique est un domaine aussi difficile à apprendre qu'à enseigner. Ce constat est aussi relevé dans le rapport annuel de l'inspection générale du Royaume Uni.

Les difficultés sont liées aux différents niveaux biologiques impliqués ...

Bahar (1999) explique ces difficultés par plusieurs raisons dont une a particulièrement retenu notre attention : l'existence de la génétique à différents niveaux biologiques et les implications que cela entraîne sur l'apprentissage.

Bahar détermine une organisation de ces niveaux selon la perception sensorielle des élèves et le degré d'abstraction qu'ils doivent adopter pour travailler à tel ou tel niveau. Il dégage trois catégories : Macro, Sub-micro et Symbolique qui correspondent à des approches différentes de la génétique. Le niveau phénotypique pour la catégorie Macro, le niveau du gène pour le Sub-micro et le niveau mathématique (distance entre gènes, calculs de probabilités de présence d'un gène) pour le Symbolique.

Ces différents niveaux biologiques ainsi que leurs relations en génétique ont aussi été l'objet d'une étude menée par Marbach-Ad (2000). Il identifie les niveaux biologiques comme étant la source des difficultés des élèves israéliens lors de l'apprentissage de la génétique au lycée. Marbach-Ad réalise, lui aussi, une organisation de ces niveaux mais en s'appuyant sur la hiérarchie biologique. Il fait ressortir trois catégories : Macroscopique (organisme), Microscopique (cellule) et Moléculaire (molécule). Il ajoute à sa classification une dimension sensorielle, comme Bahar, et différencie ces catégories par la perception qu'en ont les élèves : manipulable pour le Macroscopique, observable pour le Microscopique et imaginable pour le Moléculaire.

Marbach-Ad insiste sur le fait que les élèves n'arrivent pas à lier les connaissances des catégories Microscopique et Moléculaire aux observations Macroscopiques, ou font des erreurs lorsqu'ils essayent. Cette difficulté à lier les différents niveaux biologiques impliqués est due, selon lui, à un enseignement trop théorique et séparé dans le temps, dans des classes différentes (6^e, 3^e, 2^{nde} en cursus général) et dans des matières différentes (biologie et chimie pour le niveau moléculaire).

Duncan et Reiser (2007) qui retrouvent également ces difficultés liées aux différentes échelles biologiques, expliquent plutôt un manque de corrélation et de liens entre eux. En effet, dans leur étude, ils ne montrent pas seulement que les niveaux posent problème. Selon eux, pour les élèves, chaque niveau existe indépendamment des autres et contient du matériel biologique bien défini et différencié. Par contre, ce qu'il manque aux élèves lorsqu'ils apprennent la génétique et plus particulièrement la nature et la fonction de l'information génétique, ce sont les articulations entre les niveaux. Plus précisément, l'articulation nécessaire aux élèves pour comprendre l'information génétique est le lien entre : « an information level (containing the genetic information) and a hierarchically organized physical level . » Pour Duncan et Reiser, ce lien peut être fait par l'étude du rôle des protéines dans la transmission de l'information

génétique. C'est un sujet qui n'est étudié que lors d'études poussées en biologie mais qui manque pour la compréhension de l'information génétique dès le début de son enseignement.

Ces difficultés du domaine génétique décliné à différents niveaux biologiques et de la non-liaison des niveaux entre eux lors de l'enseignement, se retrouvent à tous les degrés scolaires, y compris chez des étudiants qui se présentent au CAPES de SVT comme l'indique le rapport du jury de 2008, où il est indiqué que les candidats ne font pas la différence entre chromosome, gène et allèle. Cette notion encore difficile après des années d'étude spécialisée en biologie, montre la persistance des difficultés.

... et au caractère abstrait du sujet

Knippels (2005) revient elle aussi sur ces difficultés liées aux différents niveaux dans son étude pour déterminer les principaux problèmes des élèves et des enseignants lors de l'apprentissage de la génétique dans le secondaire aux Pays-Bas. Elle retrouve les difficultés citées par les auteurs précédents, auxquelles elle ajoute celle liée au caractère abstrait du sujet étudié.

Des interviews menées auprès de 22 élèves de 16-17 ans, confortent cette idée. Pour eux, le fait que l'enseignement de cette matière, ne soit pas relié à des problèmes du quotidien, personnels ou sociétaux, augmente sa nature abstraite et engendre une démotivation lors de l'apprentissage. Leur compréhension de la génétique est alors limitée, confuse et entraîne des difficultés d'apprentissage pour des notions comme la division cellulaire ou la structure de l'ADN.

D'autres difficultés sont liées à la spécificité de la structure de l'information génétique sous forme ADN

Pfriedrichsen (2004) a mené une étude aux Etats-Unis pour découvrir les conceptions spontanées des élèves en génétique moléculaire afin de faire des propositions pour améliorer la compréhension de ces notions. Elle a demandé à des élèves de lycée de dessiner une molécule d'ADN. Elle a interviewé les élèves pour qu'ils commentent et expliquent 12 dessins sélectionnés. Sur ces productions, huit élèves dessinent une simple échelle sans indiquer les éléments qui la constituent, un élève dessine la molécule d'ADN comme une chaîne de chromosomes et les trois autres ne dessinent rien. Aucun élève ne donne la structure de la molécule d'ADN avec bases, phosphates et sucres.

Certains élèves interviewés expliquent leurs difficultés à faire la différence entre chromosomes, ADN et cellules par les illustrations figurant dans les ouvrages scolaires. Lorsqu'ils observent simultanément ces illustrations, ils ne comprennent pas les rapports de taille. Bien souvent, l'illustration de la structure de l'ADN (représentation issue d'un logiciel de simulation ou photo d'une structure réalisée avec boules et bâtons) est bien plus grosse que l'illustration (photo, dessin ou schéma) de la cellule placée à côté. Or comment une grosse molécule peut-elle être contenue dans le noyau d'une cellule plus petite ? Ces difficultés sont aussi liées au peu de références aux échelles ou à la taille des objets dans les manuels scolaires. Les grossissements effectués sont rarement précisés, ce qui ne facilite pas la compréhension des relations entre objets.

La structure de l'information génétique sous forme d'ADN, en dehors de son positionnement dans l'organisation biologique, pose donc un réel problème en elle-même. Mais l'ADN n'est pas seulement difficile à comprendre par sa structure, il l'est également par sa fonction : l'expression du génotype pour la détermination du phénotype d'un individu. Khattech (2007),

dans son étude, propose à des lycéens et à des étudiants tunisiens deux illustrations de la molécule d'ADN écartées par Watson. Elle leur demande de justifier le rejet de ces représentations. Elle observe alors que les justifications données par les élèves sont essentiellement liées à la structure et non à la fonction. Elle en déduit « un cloisonnement (...) » entre les propriétés physiques et biologiques de l'ADN » lors de l'enseignement. Ce cloisonnement empêche les élèves de comprendre la molécule d'ADN, car la connaissance de la structure (propriété physique de la molécule) et de la fonction (propriété biologique) sont toutes deux nécessaires pour comprendre cette notion et son articulation avec les autres objets du monde biologique.

Constat

Ces différentes recherches ont permis de dégager les difficultés des élèves dans le domaine de la génétique et plus particulièrement celles concernant l'information génétique. L'ensemble de ces études internationales explique que les difficultés des élèves sont liées, en partie, à la confusion entre les différents niveaux biologiques. Quelques-unes (Morimoto, 2002; Zion, 2006; Duncan, 2007) ont proposé des solutions pour aider les élèves lors de l'apprentissage. D'autres comme Tsui et Treagust (2007) ont cherché à caractériser et comptabiliser le changement conceptuel d'élèves australiens lors de l'apprentissage de cette notion. Nous proposons d'identifier, de classer et de modéliser les conceptions des élèves sur l'information génétique par l'intermédiaire de la localisation et des mécanismes des modifications de cette information. Nous présentons ici l'étude préliminaire à ce travail de recherche sur les conceptions, qui consiste à retrouver, dans les productions des élèves français de seconde générale, certains invariants énoncés ci-dessus. Après cette identification, une deuxième étape de notre étude consistera, dans la continuité des travaux effectués dans notre équipe (Marzin, 2007), à concevoir une situation de diagnostic des conceptions dans un cadre de travaux pratiques.

Questions de recherche et hypothèses

Les questions de recherche présentées ci-dessous constituent une partie de notre problématique générale.

Hypothèse de travail 1 : Les élèves ont des difficultés à conceptualiser la localisation d'une modification de l'information génétique.

Question de recherche : Quelles sont les conceptions des élèves à propos de l'information génétique et plus particulièrement sur la localisation d'une modification ?

Hypothèse de recherche : Les conceptions des élèves sur la localisation d'une modification de l'information génétique peuvent être réparties en six niveaux : organisme, cellule, noyau, chromosome, gène et ADN.

Analyse du savoir de référence

Nous cherchons à découvrir les conceptions des élèves sur l'information génétique et pour cela nous passons par l'étude des conceptions sur une modification de cette information.

Connaissances de référence

A partir de l'étude du savoir scientifique, nous avons dégagé les connaissances indispensables aux élèves pour qu'ils puissent comprendre la notion d'information génétique. Elles constituent les connaissances de références dont les élèves auront besoin pour résoudre le problème qui leur sera posé. Ces connaissances, adaptées au niveau seconde des élèves, sont ainsi formulées :

- L'information génétique est portée par l'ADN.
- Une molécule d'ADN est constituée de bases qui sont les principaux éléments concernés lors d'une modification.
- L'ordre et la succession des bases de l'ADN définissent le code génétique d'un organisme.
- Le code génétique caractérise un organisme et comprend toutes les informations nécessaires à sa vie, sa survie et sa croissance.
- Une modification de l'information génétique se situe au niveau de la molécule d'ADN et entraîne une modification de sa structure, de l'ordre de ses bases.
- Une modification de l'information génétique induit des modifications au sein de l'organisme muté, car elle modifie le code génétique de cet organisme.
- Une modification de l'information génétique se traduit par une expression phénotypique différente de celle de l'organisme non modifié (échelle de la cellule pour un être unicellulaire et de l'individu pour un être pluricellulaire).
- Une modification de l'information génétique se transmet directement à la descendance de la cellule dans le cas d'un être unicellulaire.
- La modification de l'information génétique se transmet à la descendance seulement si les cellules reproductrices sont touchées dans le cas d'un être pluricellulaire.

Parmi ces connaissances, certaines sont en lien avec la structure de l'information génétique : modification de la succession des bases de la molécule d'ADN. Si les élèves ne possèdent pas cette connaissance, ils ne feront pas appel à la structure de l'ADN pour expliquer ce qu'est l'information génétique. D'autres connaissances font appel à la fonction de l'information génétique : codage de l'information génétique qui définit les caractères d'un individu. L'ensemble de ces connaissances étant nécessaires, la structure et la fonction sont deux éléments de l'information génétique à comprendre simultanément. L'un sans l'autre est difficile à comprendre et entraîne des problèmes d'apprentissage pour les notions liées comme la modification de l'information.

Six niveaux biologiques

A partir de l'étude de la littérature en didactique, nous avons constaté que les élèves avaient du mal à définir la structure ainsi que la place de l'information génétique au sein de la hiérarchie des objets biologiques. Ces deux paramètres sont pourtant essentiels pour comprendre la localisation et le fonctionnement d'une modification de l'information génétique. Si les élèves ne réussissent pas à déterminer la place de l'information génétique et à en donner une définition, ils n'arriveront pas à localiser une modification de cette information, sous forme d'ADN constitué de nucléotides, et étant le plus petit élément que l'on peut changer pour faire varier les niveaux supérieurs. À quel endroit alors placent-ils ce changement de l'information génétique ?

Au vu des résultats des études précédentes et de l'étude du savoir de référence, nous avons dégagé six niveaux biologiques où les élèves pourraient localiser les modifications de l'information génétique : Organisme, Cellule, Noyau, Chromosome, Gène et ADN.

Méthodologie

Afin de vérifier l'importance de ces niveaux dans le raisonnement des élèves, nous leur avons proposé un exercice qui a pour objectif de valider ces niveaux et de classer et quantifier les réponses des élèves pour chacun d'eux.

L'exercice se compose d'un schéma à compléter, un cercle sur/dans lequel les élèves doivent indiquer l'endroit où agit un rayonnement pour provoquer la modification de l'information génétique d'un organisme vivant. Une zone de texte est également disponible pour qu'ils puissent accompagner leur schéma d'un texte explicatif.

Les 102 élèves participant à cette étude étaient tous en seconde générale et âgés de 16-17 ans. Ils ont été répartis en trois groupes (A-B-C) selon qu'ils aient ou non étudié l'information génétique et ses modifications. Dans le groupe A, on trouve 27 élèves qui n'ont jamais étudié ces notions. Le groupe B comprend 49 élèves qui ont étudié l'information génétique une semaine avant mais pas ses modifications. Le groupe C se compose de 26 élèves ayant déjà étudié les deux notions, un mois auparavant.

Pour classer les réponses des élèves dans les six niveaux définis, nous avons considéré essentiellement leurs réponses écrites, le schéma servant uniquement à clarifier une réponse quand cela était nécessaire. Pour chaque niveau, plusieurs réponses étaient acceptées (par exemple pour Cellule : « membrane cellulaire », « dans la cellule », « au centre de la cellule »). Certaines de leurs justifications étaient simple à classer : « Le rayonnement modifie la membrane cellulaire », est classé dans le niveau Cellule. Mais d'autres faisaient appel à plusieurs niveaux, nous avons donc adopté une méthode de distinction supplémentaire. Si les niveaux étaient organisés, avec une notion d'implication, d'ordre, alors c'était le plus petit qui prévalait : « Le rayonnement agit sur le chromosome qui porte un gène. Le rayonnement modifie la séquence ADN et le gène est modifié ». Le niveau considéré pour cette réponse est ADN, car on retrouve un ordre parmi les différents niveaux cités. Par contre, un élève qui écrit : « Le rayonnement agit sur le noyau et les organites cellulaires », sa réponse est non organisée, et classée dans deux niveaux : Noyau et Autre (aucun niveau n'ayant été défini pour les organites cellulaires).

Cette méthode nous a ainsi permis de classer toutes les réponses des élèves, mais en obtenant plus de réponses que d'élèves.

Résultats

A partir de la classification des réponses des élèves, nous avons calculé un pourcentage pour chaque niveau (Tableau 1).

Tableau 1 : Réponses des élèves (A : aucune notion étudiée, B : information génétique étudiée, C : information génétique et modifications étudiées)

Groupe	A		B		C		Total	
	n = 28	%	n = 56	%	n = 26	%	n = 110	%
Organisme	0	0	1	1,79	0	0	1	0,91
Cellule	10	35,71	9	16,07	7	26,92	26	23,63
Noyau	16	57,15	19	33,93	3	11,54	38	34,54
Chromosome	0	0	1	1,79	0	0	1	0,91
Gène	0	0	2	3,57	3	11,54	5	4,55
ADN	1	3,57	19	33,93	10	38,46	30	27,27
Autre	0	0	5	8,92	0	0	5	4,55
Pas de réponse		3,57	0	0	3	11,54	4	3,64

La somme des réponses des élèves pour chaque niveau, nous permet de constater la fréquence plus importante de trois d'entre eux : Cellule, Noyau et ADN. Pour le niveau Noyau, on constate une évolution entre les trois groupes, le nombre de réponses des élèves est divisé par deux lorsque l'on change de groupe, ainsi : $A > B > C$. Pour le niveau ADN, on observe le phénomène inverse, avec une accentuation quand on passe du groupe A au groupe B ou C : $A \ll B < C$. Si on regarde ces résultats par groupe, on remarque que seul le groupe B donne des réponses pour chaque niveau, alors que le groupe C n'en donne que dans quatre. Le groupe A, quant à lui, ne donne des réponses que pour trois niveaux, et principalement deux.

Conclusions et perspectives

Cet exercice nous a permis de classer les réponses des élèves dans six différents niveaux biologiques à partir de leurs justifications et de leurs dessins. Seulement quatre élèves n'ont pas répondu, ce qui semble montrer que l'exercice a donc été bien compris.

L'analyse des résultats nous a permis de confirmer les six niveaux définis à partir de notre analyse et de la littérature. L'ensemble de ces niveaux est retrouvé même si la répartition des réponses dans ses niveaux n'est pas uniforme. Deux niveaux ne possèdent qu'une réponse : Organisme et Chromosome. Pour le niveau Organisme, cela est sûrement dû à l'exercice qui présente un schéma à compléter sur lequel est représenté une cellule. Il était donc difficile pour les élèves d'imaginer un effet à un niveau supérieur. Quant au niveau Chromosome, c'est un résultat à approfondir, que nous ne comprenons pas étant donné que cette notion a été étudiée l'année précédente.

Nous avons également constaté des différences entre les groupes pour un même niveau. Ces différences peuvent être dues au moment où l'exercice a été réalisé : avant, pendant ou après l'étude des deux notions. On remarque que les groupes ayant le plus de réponses pour les niveaux moléculaires (Gène et ADN) sont les groupes B et C. Le groupe A, lui, a plus de réponses appartenant aux niveaux cellulaires (Cellule et Noyau). Ces différences peuvent être dues à l'étude récente ou non de la structure de l'information génétique. L'étude des

modifications a aussi pu avoir un effet, visible lorsqu'on compare les groupes B et C. Les élèves du groupe C donnent plus de réponses entrant dans le niveau ADN (qui peuvent être dues à l'étude des modifications de l'information génétique), au niveau Gène (ils ont étudiés les maladies génétiques) et au niveau Cellule (ils ont réalisé un TP pendant lequel ils ont observé des mutations de cellules après radiations UV). Ces résultats confirment la présence de nos six niveaux et orientent notre travail sur la modélisation des conceptions concernant l'information génétique.

La suite de notre travail consiste à diagnostiquer les conceptions des élèves pour valider une modélisation concernant l'information génétique. Nous proposons d'utiliser les quatre mécanismes possibles à l'origine d'une modification de l'information génétique : perte / ajout / échange / duplication, pour modéliser les conceptions des élèves en les appliquant sur les différents matériels biologiques présents à chacun des niveaux décrits précédemment. Cela nous donne, pour les niveaux Gène et ADN, si l'on ne considère qu'un matériel par niveaux dans cet exemple, l'organisation suivante.

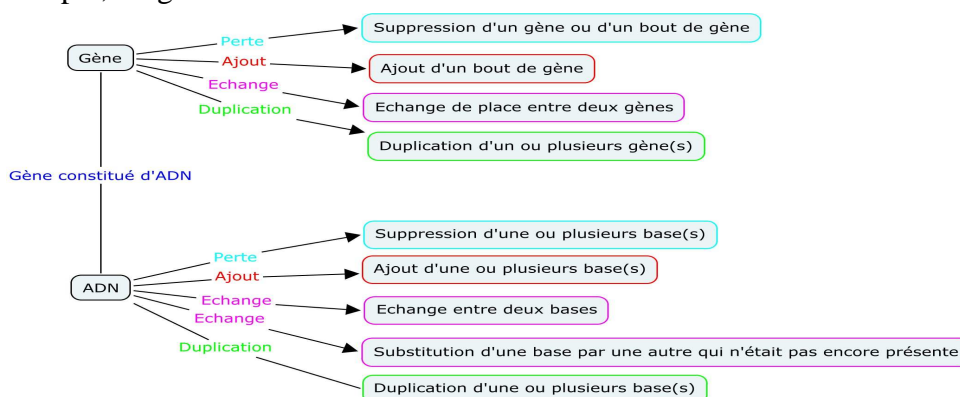


Schéma 1 : Mécanismes de changement aux niveaux Gène et ADN

Une répartition de ces mécanismes sur chaque niveau a été effectuée et les conceptions ont été modélisées à partir du modèle cK ϕ (Balacheff, 2005).

Le but final de cette étude est de proposer à des élèves de seconde la situation que nous avons construite pour diagnostiquer leurs conceptions sur l'information génétique. Cette situation a été réalisée grâce à l'implémentation de la modélisation de l'information génétique dans un EIAH permettant l'étayage de la conception de protocoles expérimentaux. Elle sera testée lors d'une séance de travaux pratiques à l'automne 2009.

Bibliographie

- Bahar, M., Johnstone, A.H. & Hansell, M.H. (1999). Revisiting learning difficulties in biology, *Journal of Biological Education*, 33 (2), 84-86.
- Balacheff, N., Margolinas C. (2005). cK ϕ modèle de connaissances pour le calcul de situations didactiques. II. Définition de conception. *Balise pour la didactique des mathématiques*, La Pensée Sauvage édition, 1-32.
- Chapel, G., Marzin, P. & Ney, M. (2008). Do students ideas about the antigen-antibody link change when they are gathered to design an experimental procedure? *ERIDOB*, 2008.
- Duncan, R. G., Reiser, B. J. (2007). Reasoning across ontologically distinct levels: students' understandings of molecular genetics, *Journal of Research in Science Teaching*, 44 (7), 938-

959.

Khattech, S., Abbes, S. & Orange, C. (2007). Argumentation du refus de deux modèles d'ADN : Conceptions et rapport au savoir d'élèves et d'étudiants tunisiens. *ARDIST*, 2007.

Knippels, M.C., Waarlo, A.J. & Boersma, K.T. (2005). Design criteria for learning and teaching genetics, *Journal of Biological Education*, vol. 39 (3), 108-112.

Johnstone, A.H. & Mahmoud, N.A. (1980). Isolating topics of high perceived difficulty in school biology, *Journal of Biological Education*, 14 (2), 163-166.

Marbach-Ad, G. & Stavy, R. (2000). Students' cellular and molecular explanations of genetic phenomena, *Journal of Biological Education*, 34 (4), 200-205.

Marzin, P., d'Ham, C. & Sanchez, E. (2007). How to scaffold the students to design experimental procedures? A proposition of a situation experienced by 108 high-schools students. *ESERA*, 2007.

Ministère de l'éducation nationale, Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche (2008). *Rapport du Jury de CAPES Externe de Sciences de la Vie et de la Terre*.

Morange, M. (2004). La génétique : une science aux caractéristiques très particulières, *Bulletin d'Histoire et d'Epistémologie des Sciences de la Vie*, 11 (2), 235-247.

Morimoto, K. (2002). Demonstrating the influence of UV rays on living things, *Journal of Biological Education*, 37 (2), 39-43.

Pfriedrichsen, P. & Stone, B. (2004). Examining Students' Conceptions of Molecular Genetics in an Introductory Biology Course for Non-Science Majors: A Self Study. *NARST*, 2004.

Tsui, C.-Y., Treagust, D. F. (2007). Understanding genetics: analysis of secondary students' conceptual status, *Journal of Research in Science Teaching*, 44 (2), 205-235.

Zion, M., Guy, D., Yarom, R., & Slesak, M. (2006). UV radiation damage and bacterial DNA repair systems, *Journal of Biological Education*, 41 (1), 30-33.