

THESIS / THÈSE

MASTER EN SCIENCES BIOLOGIQUES

Rémanence des processus de mitose et de méiose chez les élèves du secondaire

Joine, Stéphanie

Award date:
2015

Awarding institution:
Universite de Namur

[Link to publication](#)

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal ?

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

UNIVERSITE DE NAMUR

Faculté des Sciences

**REMANENCE DES PROCESSUS DE MITOSE ET DE MEIOSE CHEZ LES
ELEVES DE L'ENSEIGNEMENT SECONDAIRE GENERAL**

**Mémoire présenté pour l'obtention
du grade académique de master 60 en biologie**

Stéphanie JOINE

Août 2015

Université de Namur
FACULTE DES SCIENCES
Secrétariat du Département de Biologie
Rue de Bruxelles 61 - 5000 NAMUR
Téléphone: + 32(0)81.72.44.18 - Téléfax: + 32(0)81.72.44.20
E-mail: joelle.jonet@unamur.be - <http://www.unamur.be>

Rémanence des processus de mitose et de méiose chez les élèves du secondaire

JOINE Stéphanie

Résumé

Après avoir réalisé la synthèse des livres universitaires de référence sur le sujet de la mitose et de la méiose, un questionnaire a été soumis à des élèves de l'enseignement secondaire général, orientation sciences générales afin de faire un état de leur connaissance. Il s'articulait en trois parties. Dans la première partie, l'élève devait schématiser la mitose à partir d'une feuille blanche. Sur base de concepts jugés prépondérants (l'alignement des chromosomes, la séparation des chromatides et leur sort en télophase), un système de catégorisation des schémas a été créé. Ensuite, les points clés de la méiose, à savoir les étapes de métaphase et d'anaphase I et II, ont été évalués sur base de schémas sur lesquels l'élève devait replacer les chromosomes. Il était également invité à développer en quelques lignes ce processus. Enfin, des concepts tels que l'impact de la méiose au niveau génétique, la localisation des processus de mitose et de méiose chez l'Homme, ainsi que la réplication ont été évalués sur base de questions ouvertes. Les résultats ont ensuite été comparés à ceux d'élèves d'autres pays. Enfin, les causes possibles des erreurs conceptuelles ont été recherchées dans les manuels à destination des secondaires puis de façon plus large, dans la littérature.

Comme attendu, les élèves francophones ont les mêmes difficultés que les autres élèves étudiés de par le monde. Les processus de mitose et de méiose sont donc également difficiles à comprendre pour eux. Néanmoins, bien qu'effectivement des simplifications dans les manuels scolaires étaient suspectées, et ce à des fins didactiques, l'observation d'erreurs n'était, elle, pas attendue.

Mémoire de master 60 en biologie

Août 2015

Promoteurs : A. Vervoort et E. Depiereux

Université de Namur
FACULTE DES SCIENCES
Secrétariat du Département de Biologie
Rue de Bruxelles 61 - 5000 NAMUR
Téléphone: + 32(0)81.72.44.18 - Téléfax: + 32(0)81.72.44.20
E-mail: joelle.jonet@unamur.be - <http://www.unamur.be>

Rémanence des processus de mitose et de méiose chez les élèves du secondaire

JOINE Stéphanie

Abstract

In the light of the scientific literature dealing with mitosis and meiosis, a questionnaire was submitted to general secondary year students (sciences as their main orientation) in order to assess their knowledge on the matter. The questionnaire was divided into three parts. In the first part student had to sketch mitosis starting from scratch. On the basis of concepts considered as predominant concepts (chromosomes alignment, separation in chromatids and the fate of them in telophase), a system for categorising drawings was set up. Subsequently, meiosis key points, namely the metaphase and anaphase I and II were assessed from drawings on which student had to replace chromosomes. Each pupil was also invited to develop this process in a few lines. Then, concepts like genetic impact of meiosis, mitosis and meiosis location in adult human as well as replication were assessed with open-ended questions. The results were then matched with other results taken from other countries. Finally, possible causes of misconceptions found in the literature aimed at secondary year students were researched. Such possible misconceptions were also researched in the general scientific literature.

As expected, French-speaking students encounter the same difficulties as students surveyed in other countries. Mitosis and meiosis processes therefore seem to be difficult concepts to be understood by pupils. However, although we had clearly expected to find effective simplifications of intricate concepts in textbooks aimed at pupils (this for didactic purposes), finding mistakes regarding the scientific contents was not anticipated.

Mémoire de master 60 en biologie

Août 2015

Promoteurs : A. Vervoort et E. Depiereux

REMERCIEMENTS

Avant de présenter ce mémoire, je me permets de remercier certaines personnes.

Tout d'abord, je remercie Mrs. E. Depiereux, A. Vervoort, X. De Bolle, F. Silvestre, J. Messiaen, Mmes M. Raes, C. Michiels, K. Van Doninck, sans qui cette aventure « Master 60 » n'aurait pas pu se réaliser.

Mes remerciements vont aussi aux membres de l'Unité Méthodologique de la Didactique et de la Biologie (UMDB), Mrs A. Vervoort, E. Depiereux, M. Regnier, J.-P. Troussart, A.-C. Wauthy, B. Bihin, pour leur aide précieuse dans la réalisation de mon mémoire, de même qu'aux autres membres de l'UMDB pour leur accueil chaleureux.

Je souhaite de plus remercier Mme A. Woine pour son aide en ce qui concerne mon anglais.

Je remercie également plus particulièrement et avec un peu de retard, Mme N. Kirschvink, qui, de près ou de loin, a toujours été là pour moi.

Enfin, je remercie mon compagnon Raphaël Jumet qui m'a permis de reprendre ces études et qui a géré le quotidien de la maison pour nous durant ces deux années.

Table des matières

Introduction	1
Partie 1 : Introduction	2
I. Aspects théoriques des processus de mitose et de méiose	2
A. 2 acteurs principaux de la division cellulaire	2
1. L'ADN	2
1.1 Code génétique	2
1.2 Les gènes	3
1.3 Chromatides et chromosomes	4
1.4 Niveaux de condensation	6
2. Le centrosome	10
B. Le choix du modèle animal classique	12
1. Cycles de développement des organismes	12
2. Diversité de divisions non sexuées et sexuées	13
C. Cycle cellulaire	16
1. L'interphase	16
2. La division cellulaire	17
2.1 Phase M	17
2.1.1 Les différentes étapes de la mitose	18
a) Prophase	18
b) Prométaphase et métaphase	19
c) Anaphase	19
d) Téléphase	21
2.1.2 Cytocinèse	22
2.2 Méiose	23
2.2.1 Méiose I ou division réductionnelle	23
a) Prophase I	23
b) Métaphase I	24
c) Anaphase I	25
d) Téléphase I et cytokinèse	26
2.2.2 Méiose II ou division équationnelle	27
a) Prophase II	27
b) Métaphase II	27
c) Anaphase II	28
d) Téléphase II et cytokinèse	28

II. Recensement des concepts problématiques et des erreurs conceptuelles des élèves décrits dans la littérature.....	29
III. La transposition didactique	34
IV. Objectifs.....	35
Partie 2 : Matériel et méthodes	36
I. Cartes conceptuelles	36
II. Questionnaire à destination de l'enseignement secondaire.....	36
A. Construction du questionnaire.....	36
B. Description du questionnaire.....	36
1. Mitose	36
2. Méiose.....	36
3. Questions ouvertes.....	37
C. Déroulement de l'évaluation	37
D. Correction du questionnaire	37
1. Mitose	38
1.1 Catégorisation des schémas	38
1.2 Correction étape par étape.....	38
1.3 Concepts généraux	39
2. Méiose.....	40
3. Questions ouvertes.....	40
E. Analyse des résultats	40
F. Étude de livres à destination des élèves du secondaire.....	40
Partie 3 : Résultats	41
I. Cartes conceptuelles	41
II. Questionnaires à destination des secondaires	41
A. Mitose	41
1. Fréquence relative de chaque catégorie	41
2. Nombre de concepts connus par catégorie et différences entre catégories	42
3. Compréhension des différentes étapes de la mitose	43
4. Compréhension des différents concepts de la mitose	44
B. Méiose	46
C. Questions ouvertes.....	47
1. La méiose apporte-t-elle des changements génétiques au cours de son processus ?	47
2. Toutes les cellules d'un homme à l'âge adulte se divisent-elles ? Lesquelles sont en mitose ? Lesquelles sont en méiose ? Donne des exemples	47
2.1 Toutes les cellules d'un homme à l'âge adulte se divisent-elles ?.....	47

2.2	Exemples donnés pour les cellules effectuant la mitose ou la méiose	48
3.	Les questions liées à la réplication	49
3.1	À quel moment se produit la réplication/duplication de l'ADN ?	49
3.2	La réplication/duplication de l'ADN double la quantité d'ADN, le nombre de chromosomes ainsi que les jeux de chromosomes	50
D.	Observation supplémentaire.....	50
III.	Livres à destination des élèves du secondaire, sciences générales	51
A.	4 ^{ème} : mitose.....	51
1.	Les éditions de Boeck (Cornet, 2008).....	51
1.1	Description du livre.....	51
1.2	Les aspects qui diffèrent des livres universitaires de référence en Biologie, ou jugés positifs	51
2.	Les éditions Van in (Delvigne <i>et al.</i> , 2009)	52
2.1	Description du livre.....	52
2.2	Les aspects qui diffèrent des livres universitaires de référence en Biologie, ou jugés positifs	52
3.	Les éditions Plantyn, collection essentia, 4 ^{ème} année (Buschen <i>et al.</i> , 2012-2013)	53
3.1	Description du livre.....	53
3.2	Les aspects qui diffèrent des livres universitaires de référence en Biologie, ou jugés positifs	53
B.	5 ^{ème} : méiose	54
1.	De Boeck collection bio (Cornet, 2009)	54
2.	Van in (Delvigne <i>et al.</i> , 2009).....	55
IV.	Les livres de référence en Biologie	57
Partie 4 : Discussion		59
I.	Résultats des questionnaires.....	59
A.	Comparaison des erreurs conceptuelles avec la littérature.....	59
B.	Hypothèses de causes des erreurs conceptuelles commises	60
1.	Les manuels scolaires.....	60
2.	Autres causes possibles	63
2.1	Les professeurs.....	63
2.2	Le peu de temps et de matériel.....	63
2.3	Manque de compréhension de concepts de base ou de liens entre différents points	64
2.4	La multitude de termes	65
C.	Le système de catégorisation.....	66
II.	Construction et modifications ultérieures du questionnaire	68

III. Déroulement de l'évaluation	75
Conclusion.....	77
Perspectives.....	78
Annexes.....	79
Annexe 1 : Complément d'information sur la théorie.....	79
Annexe 2 : Les pourcentages d'élèves réalisant les erreurs conceptuelles	79
Annexe 3 : Questionnaire à destination des élèves de 6 ^{ème} année de l'enseignement secondaire général, sciences générales	79
Annexe 4 : Grille de correction des questionnaires des élèves du secondaire	79
Annexe 5 : Schémas correctifs pour la mitose.....	79
Annexe 6 : Les cartes conceptuelles	79
Annexe 7 : Questionnaire à destination des premiers baccalauréats en Biologie, résultats des premiers baccalauréats en Biologie et des étudiants en agrégation – TFB Audrey Gilson	79
Bibliographie.....	80

Table des figures

Figure 1: Le code génétique (Campbell et Reece, 2007)	2
Figure 2: Jeu de chromosomes et "n" (Reece et al., 2012).....	5
Figure 3: Les différents niveaux de condensation de la chromatine jusqu'au chromosome (modifié à partir du Campbell et Reece, 2007)	7
Figure 4: Enroulement de l'ADN grâce aux condensines (modifié à partir du Alberts et al., 2012)	8
Figure 5: Position du (des) centrosome(s) en fonction de l'étape du cycle cellulaire (Alberts et al., 2012).....	11
Figure 6: Les différents types de microtubules (modifié à partir du Alberts et al., 2012)	11
Figure 7: Les différents cycles de développement (modifié à partir du Campbell et Reece, 2007)	13
Figure 8: Les différents types de mitose (modifié à partir du Campbell et Reece, 2007).....	15
Figure 9: Les différentes étapes du cycle cellulaire (Raven et al., 2014).....	16
Figure 10: Différents modèles de la liaison des chromatides sœurs grâce à la cohésine (a) Alberts et al., 2012 ; b) Raven et al., 2014.....	17
Figure 11: La prophase (réalisé via Powerpoint).....	18
Figure 12 : La métaphase (réalisé via Powerpoint)	19
Figure 13 : L'anaphase (réalisé via Powerpoint).....	20
Figure 14: Activation de la séparation (Alberts et al., 2012)	20
Figure 15: Mouvement des microtubules en anaphase A et B (Alberts et al., 2012).....	21
Figure 16: La télophase (réalisé via Powerpoint)	22
Figure 17: Crossing over entre chromosomes homologues (réalisé via Powerpoint).....	23
Figure 18: La métaphase I (réalisé via Powerpoint)	25
Figure 19: L'anaphase I (réalisé via Powerpoint).....	25
Figure 20: La télophase I (réalisé via Powerpoint).....	26
Figure 21: La métaphase II (réalisé via Powerpoint)	27
Figure 22: L'anaphase II (réalisé via Powerpoint)	28
Figure 23: La télophase II (réalisé via Powerpoint).....	28
Figure 24: Diagramme de la fréquence relative d'élèves par catégorie (Catégories définies dans le matériel et méthodes ; N=170 élèves).....	41
Figure 25: Diagramme en moustache du nombre de concepts connus par élève dans chaque catégorie (N : Catégorie 1=11 élèves ; 2=43 ; 3=34 ; 4.1=18 ; 4.2=16 ; 5=48).....	42
Figure 26 : Diagrammes représentant les fréquences relatives de la compréhension, des termes utilisés, de la correspondance et de l'ordre des phases (N=170).....	44
Figure 27: Diagramme de la fréquence relative de la compréhension, non compréhension ou non réponse à différents concepts par les élèves (N= 170 élèves)	45
Figure 28: Schéma illustrant une double mitose et l'effet de la présence des microtubules polaires chez les élèves	46
Figure 29: Fréquence relative des réponses à la question "la méiose apporte-t-elle des changements génétiques au cours de son processus?" (N = 170 élèves ; Sans réponse=28%, érudés du graphique) .47	
Figure 30: Fréquence relative de réponse correcte, incorrecte ou de sans réponse à la question "toutes les cellules d'un homme à l'âge adulte se divisent-elles ?" (N= 170 élèves).....	48
Figure 31: Fréquence relative de chaque exemple en réponse à la question "quelles cellules effectuent la mitose ?" (N = 170 élèves).....	48
Figure 32: Fréquence relative de chaque exemple en réponse à la question "quelles cellules effectuent la méiose ?" (N = 170 élèves)	49
Figure 33: Fréquence relative des réponses à la question « quand a lieu la réplication ? » (N = 170 élèves)	49

Figure 34: Fréquence relative de chaque réponse pour la question de l'effet de la réplication (bonne réponse = double la quantité d'ADN mais pas le nombre de chromosomes ni le nombre de jeux de chromosomes) (N = 170 élèves).....	50
Figure 35: Cycle cellulaire selon le de Boeck collection bio (2008)	52
Figure 36: Nombre n de chromatides selon le de Boeck collection bio (2009).....	54
Figure 37: Schéma de la méiose selon le de Boeck collection bio (2009)	55

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des degrés de compaction de la chromatine au chromosome dans les livres de référence de biologie (Alberts et al., 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven et al., 2014 ; Reece et al., 2012).....	9
Tableau 2: Concepts problématiques dans la compréhension des processus de mitose et de méiose....	33
Tableau 3: Les différentes catégories d'élèves en fonction du schéma de la mitose.....	38
Tableau 4: Les différents concepts présents dans la grille d'évaluation de la mitose	39
Tableau 5: Moyenne et écart-type du nombre de concepts connus par élève et par catégorie ; catégories non significativement différentes l'une de l'autre	43
Tableau 6: Tableau comparatif de points importants entre livres (CO= crossing over ; MT= microtubules).....	56
Tableau 7: Différents termes utilisés pour la forme du chromosome en fonction du livre de référence	57

Introduction

Dans notre société actuelle, de nombreuses technologies reposent sur les concepts de gène, de multiplication cellulaire ou de transmission héréditaire. La compréhension de ces concepts semble donc devenir nécessaire pour tout un chacun afin qu'il puisse être un citoyen responsable (Décret « Missions » 1997). Dans le cadre de ce mémoire a donc été étudiée la rémanence des processus de mitose et de méiose chez les élèves du secondaire. Des études comme par exemple celles de Dikmenli (2010) et de Lewis (2000) montrent que l'on s'intéresse à cette problématique depuis plusieurs années et dans différents pays, que ce soit en Amérique, en Inde, au Royaume-Unis ou en Turquie. En effet, ce sujet est régulièrement cité comme l'un des plus difficiles à comprendre pour les élèves (Çimer, 2012 ; Chattopadhyay, 2012).

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la thèse de Maxime Regnier, doctorant au sein de l'Unité Méthodologique de la Didactique et de la Biologie (UMDB). La première étape de celui-ci a été de rassembler l'information de divers livres souvent utilisés comme référence par les universitaires pour constituer une synthèse théorique solide sur les processus de mitose et de méiose. Celle-ci a fourni une connaissance approfondie de la matière pour ensuite pouvoir évaluer les erreurs conceptuelles effectuées par un échantillon d'élèves francophones, via la production d'un questionnaire. D'abord testé sur des premiers baccalauréats en Biologie, il a été remanié pour interroger les élèves de sixième secondaire de l'enseignement général, option sciences générales. Ce questionnaire avait pour but d'étudier des aspects généraux mais aussi des concepts plus spécifiques de la mitose et de la méiose. Les résultats des élèves du secondaire ont alors été analysés et comparés avec la littérature étrangère. De plus, au-delà de l'étude des erreurs commises par les élèves, la thèse dans laquelle s'insère ce mémoire a pour but de développer une séquence de cours optimale. Afin de disposer d'informations complètes pour démarrer la construction de cette dernière, il est également intéressant d'envisager les causes pouvant amener les élèves à commettre ces erreurs. Celles-ci ont été recherchées dans les manuels scolaires puis dans la littérature. In fine, la construction du questionnaire, dont le but est de produire un outil d'évaluation de séquences de cours, sera évaluée et critiquée.

Partie 1 : Introduction

I. Aspects théoriques des processus de mitose et de méiose

Seule la théorie directement en lien avec les processus de mitose et de méiose a été développée dans cette partie. Néanmoins, certains points ne faisant pas partie de la théorie de ces deux processus sont nécessaires à une compréhension plus complète. Ils n'ont pas été décrits dans cette introduction mais sont disponibles en Annexe 1.

Ce mémoire se focalisera essentiellement sur la division des cellules eucaryotes animales qui servent de modèle dans l'enseignement secondaire.

A. 2 acteurs principaux de la division cellulaire

1. L'ADN

1.1 Code génétique

L'acide désoxyribonucléique (ADN) contient des phases ouvertes de lecture qui permettent de synthétiser des protéines par transcription en acide ribonucléique (ARN messager ou ARNm) puis traduction en séquences d'acides aminés, par liaison peptidique catalysée par le ribosome. Cette traduction permet de passer d'une séquence en nucléotides (l'ARNm) à une séquence en acides aminés (la protéine) en fonction du code génétique (Figure 1) ; un codon ou triplet de nucléotides de l'ARNm déterminant l'acide aminé qui sera ajouté à la protéine en formation (polypeptide).

		Deuxième base de l'ARNm					
		U	C	A	G		
U	UUU	Phe	UCU	UAU	Tyr	UGU	Cys
	UUC	UCC	UAC	UGC			
	UUA	UCA	UAA Arrêt	UGA Arrêt			
	UUG	UCG	UAG Arrêt	UGG	Trp		
C	CUU	CCU	CAU	His	CGU		
	CUC	CCC	CAC	His	CGC		
	CUA	CCA	CAA	Gin	CGA	Arg	
	CUG	CCG	CAG	Gin	CGG		
A	AUU	ACU	AAU	Asn	AGU	Ser	
	AUC	ACC	AAC	Asn	AGC		
	AUA	ACA	AAA	Lys	AGA	Arg	
	AUG	ACG	AAG	Lys	AGG		
G	GUU	GCU	GAU	Asp	GGU		
	GUC	GCC	GAC	Asp	GGC		
	GUA	GCA	GAA	Glu	GGA	Gly	
	GUG	GCG	GAG	Glu	GGG		

Figure 1: Le code génétique (Campbell et Reece, 2007)

Si l'ADN est le support stable de l'information, l'ARNm et les protéines sont régulièrement recyclés (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Alberts *et al.* (2012), Raven *et al.* (2014) et Reece *et al.* (2012) désignent ce processus par l'expression « dogme¹ central de la biologie moléculaire » utilisée par Francis Crick lors de sa découverte en 1958.

Néanmoins, dans le cadre de ce mémoire centré sur les processus de mitose et de méiose, je n'entrerai pas dans les détails de la transcription et de la traduction.

1.2 Les gènes

Les gènes sont, selon Reece *et al.* (2012) une « unité d'information génétique située sur les chromosomes et constituée d'une séquence spécifique de nucléotides dans l'ADN ». Les chromosomes sont, quant à eux, « une structure cellulaire porteuse de l'information génétique contenue dans le noyau des cellules eucaryotes. Chaque chromosome contient une très longue molécule d'ADN et des protéines associées » (Reece *et al.* (2012).

Le terme « gène » n'est pas univoque car il a évolué au cours de l'histoire et du contexte dans lequel on l'envisage. Dans celui de l'étude la mitose et de la méiose, on peut considérer une définition fonctionnelle et une définition topographique.

- Fonctionnellement, on peut faire l'impasse sur la présence d'introns et l'épissage alternatif et considérer le gène comme une séquence d'ADN spécifique responsable de la capacité d'une cellule à produire un polypeptide particulier, alors qu'en réalité il peut en produire plusieurs. Cependant, il paraît préférable d'inclure dans la définition du gène, les promoteurs et les régions régulatrices qui conditionneront la capacité et l'intensité de son expression, puisque privée de cette information, la cellule ne sera pas capable de l'exprimer.
- Topographiquement, le gène correspond à une région précise d'un chromosome et l'on peut considérer ici qu'un gène est équivalent à un *locus*.

En combinant ces deux définitions, on peut considérer que la présence d'un locus sur un chromosome (génotype) correspond à la *capacité* d'une cellule à produire un polypeptide

¹ On notera cependant que pérenniser le mot initial « dogme » qui fait référence à « une idée qui n'est pas étayée par des preuves rationnelles » peut prêter à confusion.

particulier (phénotype) (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2004 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Cependant, cette séquence d'ADN n'est pas nécessairement identique d'un individu à l'autre. Il s'y est produit des modifications (mutations) dont certaines dans les régions codantes ou régulatrices. Ces différences peuvent concerner des variantes phénotypiques équivalentement fonctionnelles (couleur des yeux, du pelage...) ou provoquer une déficience fonctionnelle (on parle alors d'une tare, responsable de maladies héréditaires) (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2004 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Les cellules étudiées ici étant diploïdes, elles portent deux jeux de chromosomes de topographie identique. Deux exemplaires du gène peuvent cohabiter, il s'agit des allèles, qui sont le résultat de ces mutations. Généralement, un allèle est dominant et l'autre récessif, le gène exprimé étant celui de l'allèle dominant. Cela permet aux individus porteurs d'une tare de ne pas être affectés par la déficience.

Les gamètes produits par la méiose sont quant à eux haploïdes, ce qui signifie qu'ils ne contiennent qu'un jeu de chromosomes et ne portent donc qu'un des allèles. Si à la fusion des gamètes mâles et femelles, les deux allèles sont récessifs, il n'y a plus de compensation à la tare et la déficience affectera le phénotype (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2004 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

1.3 Chromatides et chromosomes

La longueur cumulée des brins d'ADN (X) est de l'ordre du mètre alors que celle de la cellule animale moyenne est de l'ordre de 10^{-5} m. Leur gestion demande donc un empaquetage, qui sera décrit dans le point suivant. Au moment d'une division cellulaire (mitose ou méiose), l'ADN est dupliqué en deux chromatides sœurs et forme un chromosome, dans lequel la quantité d'ADN est 2X (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Le nombre de chromosomes est fonction de l'espèce, la cellule diploïde humaine contient 2 jeux de 23 chromosomes et la drosophile 2 jeux de 4 chromosomes (Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Vingt-trois et quatre représentent le nombre de chromosomes originaux, noté de façon générale « n » (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Les cellules diploïdes sont « 2n »

et les cellules haploïdes « n »² (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Les chromosomes sont répartis en autosomes et en chromosomes sexuels. Chez l'Homme, il y a 44 autosomes et 2 chromosomes sexuels (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Les paires de chromosomes chez les êtres humains sont dites chromosomes homologues (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012; Figure 2), sauf pour la paire de chromosomes sexuels X et Y chez les mâles (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Chaque paire correspond à un chromosome du père et un chromosome de la mère (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

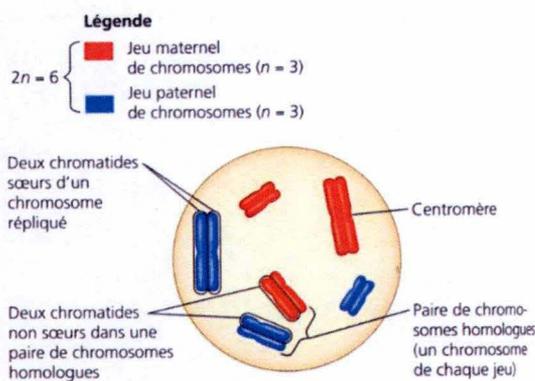


Figure 2: Jeu de chromosomes et "n" (Reece *et al.*, 2012)

Dans l'approche conceptuelle et particulièrement dans son enseignement, il faut bien prendre garde à la confusion entre le nombre de chromosomes n et la quantité d'ADN X . X représente la quantité totale d'ADN en dehors des phases de mitose et méiose. Elle sera $X/2$ dans des cellules haploïdes (après la méiose) et $2X$ après répllication de l'ADN (avant la mitose).

De même, il faut prendre garde à la confusion entre paire de chromosomes homologues et chromatides sœurs. La représentation classique d'un chromosome (Figure 2) se fait *après* la

² Il existe également des organismes qui, dans leurs cellules somatiques, contiennent 3 jeux de chromosomes, ce sont des triploïdes, $3n$. Les bananes, *Musa paradisiaca*, en sont un exemple. Parfois, les cellules somatiques contiennent 4 jeux de chromosomes. Ce sont des tétraploïdes, c'est à dire $4n$. Le blé, *Triticum aestivum*, est, quant à lui, hexaploïde, $6n$ et la fraise *Fragaria sp* est octoploïde, $8n$ (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Cependant ces cas sont rares chez les animaux, la mitose et la méiose pour des espèces polyploïdes ne seront donc pas décrites.

réplication de l'ADN précédant la division cellulaire. C'est donc une étape où les allèles sont présents 4 fois ($2n$ et $2X$).

1.4 Niveaux de condensation

Le premier niveau de condensation de l'ADN est permis par les histones. Celles-ci s'assemblent en un octamère contenant 2 fois H2A, H2B, H3 et H4, autour duquel s'enroule l'ADN pour former une fibre de 10nm. Cette association est réalisée grâce à l'interaction entre les acides aminés chargés positivement des histones, à savoir les lysines et les arginines, et les charges négatives des groupements phosphate de l'ADN (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012; Figure 3). Dans certains livres, l'ADN enroulé autour de l'octamère est nommé nucléosome, l'ADN présent entre deux octamères étant alors appelé ADN internucléosomique (Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Dans d'autres, le nucléosome comprend l'ADN enroulé autour de l'octamère, nommé cœur du nucléosome, ainsi que l'ADN entre deux octamères (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014).

Entre ces nucléosomes peut s'ajouter une histone H1 qui permet une condensation plus importante et la formation de la fibre de chromatine de 30nm (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

À partir des fibres de 30 nm peuvent se former les domaines en boucle qui condensent encore de façon plus importante l'ADN (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

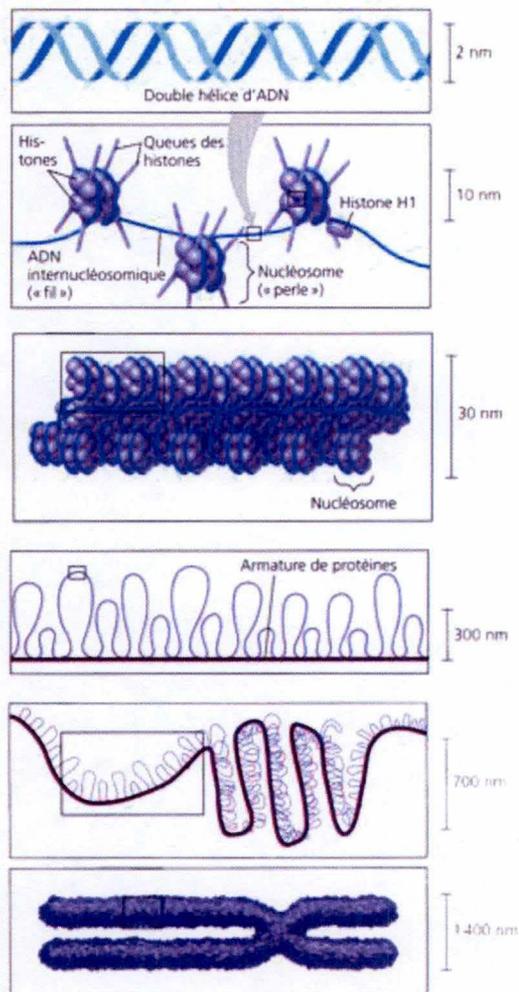


Figure 3: Les différents niveaux de condensation de la chromatine jusqu'au chromosome (modifié à partir du Campbell et Reece, 2007)

Ces premiers niveaux de condensation sont les niveaux de condensation maximums que l'on peut observer dans une cellule en interphase. Durant cette étape, deux niveaux de condensation de la chromatine sont présents : l'euchromatine et l'hétérochromatine. L'euchromatine est la chromatine dont l'état de condensation permet la transcription, alors que l'hétérochromatine est plus condensée, ce qui empêche la transcription des gènes à son niveau (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Des disparités concernant le niveau de condensation de ces deux formes de chromatine en interphase existent entre livres. Beaucoup d'auteurs précisent néanmoins que l'hétérochromatine est une forme aussi condensée que celle d'un chromosome en mitose (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012).

Mais, lorsque la cellule entre en mitose ou en méiose, une fois l'ADN répliqué, la chromatine se condense pour former des chromosomes constitués de 2 chromatides sœurs. Celles-ci se rejoignent au niveau de leur centromère grâce à de la cohésine (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Des disparités concernant la condensation de l'ADN existent néanmoins selon la source consultée (Tableau 1).

Selon certains auteurs, afin d'arriver à la forme caractéristique du chromosome que l'on peut observer en métaphase (voir mitose), les domaines en boucle qui, selon eux, font 300 nm, subissent un repliement et un enroulement. Ensemble, ils forment une fibre de 700nm pour une chromatide. Un chromosome étant constitué de deux chromatides, il fait donc 1400 nm (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). D'autres mentionnent simplement un niveau de condensation supplémentaire après la fibre 30 nm qui impliquerait des boucles (Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014). Enfin, selon un auteur, la condensation qui suit les domaines en boucle donne des fibres de 80 à 100nm qui pourront ensuite se condenser et former des chromosomes (Karp, 2010).

Enfin, selon certains livres, les domaines en boucle peuvent se fixer à un support de protéine, la lamina nucléaire et éventuellement à la matrice nucléaire (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Tous ne mentionnent pas les condensines (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Ces molécules aident la chromatine à se condenser (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Figure 4).

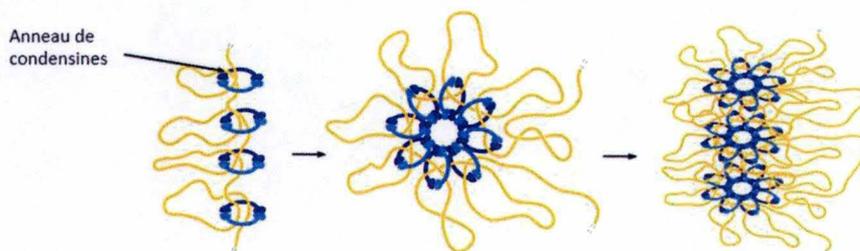


Figure 4: Enroulement de l'ADN grâce aux condensines (modifié à partir du Alberts *et al.*, 2012)

Tableau 1 : Description des degrés de compaction de la chromatine au chromosome dans les livres de référence de biologie (Alberts et al., 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven et al., 2014 ; Reece et al., 2012)

Critères	Campbell et Reece, 2007 ; Reece et al., 2012	Alberts et al., 2012	Karp, 2010	Raven et al., 2014
Les degrés d'enroulement	Fibre de 10 nm : Nucléosome			Nucléosome Taille non spécifiée
	Fibre de 30 nm : Histone H1			Fibre de 30 nm
	Domaines en boucle de 300nm		Boucles Taille non spécifiée	Chromosomes : condensation supérieure, support de protéine et boucles
	Chromosome métaphasique : 700nm/chromatide		Condensation des boucles en fibres de 80-100nm	/
			Condensation supérieure en chromosomes	
Lien à la lamina ou à la matrice nucléaire	Domaines en boucle liés à la lamina nucléaire	/	Boucles attachées à des protéines de la matrice nucléaire	Chromatine de la fibre de 30 nm se fixe à support de protéines
Mention des condensines	Non	Oui : pour la formation des domaines en boucle et des niveaux de condensation supérieurs	Oui : pour la formation des domaines en boucle	Oui : pour la formation des boucles

2. Le centrosome

Le centrosome est un organelle situé à proximité du noyau et à partir duquel se forment les microtubules. Ces microtubules subissent un réarrangement au moment de la mitose afin de permettre au centrosome, qui s'est dupliqué durant l'interphase, de produire le fuseau mitotique, aussi appelé fuseau de division ou appareil fusorial (Figure 5). Les microtubules portent alors différents noms selon leur localisation et leur fonction dans la cellule. Les microtubules interpolaire, aussi appelés polaires ou fibres polaires, sont les microtubules partant de chaque centrosome et qui se lient ensemble. Les microtubules qui irradient autour de chaque centrosome, vers la membrane plasmique, sont appelés microtubules de l'aster, fibres de l'aster ou aster. Quant aux microtubules partant de chaque centrosome et attachés aux kinétochores des chromosomes, ils sont appelés microtubules kinétochoriens ou fibres chromosomiques. Un chromosome comporte deux kinétochores, composés de protéines qui se lient au niveau du centromère en fin de prophase (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012) (Figure 6). Les schémas de la mitose simplifient souvent quelque peu les choses car, en réalité, plusieurs microtubules s'attachent à un kinétochore³ (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Une fois le fuseau mitotique formé, les centrosomes sont appelés pôles du fuseau (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012).

Le centrosome est constitué de deux ensembles de 9 triplets de microtubules qui forment les centrioles (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Toutefois, il existe des cellules animales sans centrosome (Campbell et Reece, 2007) ou avec centrosome mais sans centrioles (Alberts *et al.*, 2012).

³ Le nombre étant fonction de l'espèce (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012).

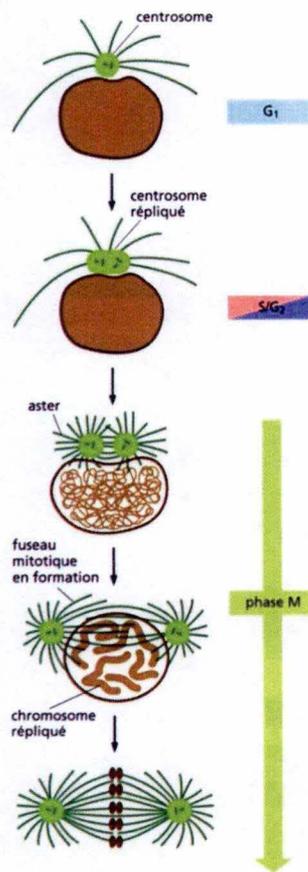


Figure 5: Position du (des) centrosome(s) en fonction de l'étape du cycle cellulaire (Alberts et al., 2012)

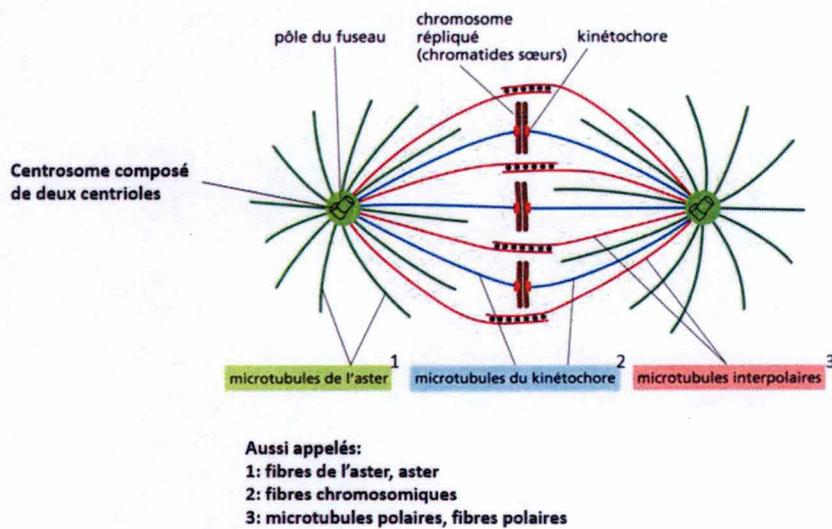


Figure 6: Les différents types de microtubules (modifié à partir du Alberts et al., 2012)

B. Le choix du modèle animal classique

Le champ d'intérêt de ce mémoire va momentanément être élargi afin de montrer la diversité existant dans le cadre de la mitose et de la méiose et de justifier ainsi le choix de se limiter au cas des Animaux classiquement utilisés comme modèles dans l'enseignement secondaire.

1. Cycles de développement des organismes

Cette partie va décrire des cas classiques d'haploïdie et de diploïdie. Ces deux derniers termes sont d'ailleurs déjà sous-entendus dans la dénomination utilisée pour définir les trois types de cycles de développement, à savoir diplophasique, haplodiplophasique et haplophasique (Termes utilisés par Berthet et Amar-Costesec, 2006 ; Figure 7). Néanmoins, des organismes dont le nombre de jeux de chromosomes est supérieur à 2 peuvent également faire de la mitose et de la méiose. Ainsi, un organisme tétraploïde formera, par méiose, des gamètes diploïdes (Dubois, 2010). Ces types de cycles de développement sont fonction de la durée des stades diploïdes et haploïdes (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Le premier type de cycle de développement est appelé diplophasique. C'est le cas des Humains. Dans ce type de cycle, la méiose permet de produire des gamètes, seules cellules haploïdes de l'organisme, qui fusionnent pour donner un zygote diploïde (Berthet et Amar-Costesec, 2006 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Le deuxième type de cycle est le cycle haplodiplophasique ou alternance de phase (Berthet et Amar-Costesec, 2006 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). C'est le cas de la levure *Saccharomyces cerevisiae* (Campbell et Reece, 2007). Chez ces organismes, il existe deux phases de vie multicellulaires, une phase diploïde que l'on appelle sporophyte et une phase haploïde que l'on appelle gamétophyte. Le sporophyte, par méiose, donne une spore qui est une cellule haploïde. Celle-ci, en effectuant plusieurs mitoses, produit le gamétophyte dont les cellules, toujours par mitose, permettent la formation de gamètes. Ces derniers vont alors fusionner en un zygote diploïde, le sporophyte. En réalité, le gamétophyte peut soit faire partie du sporophyte, soit être une entité à part entière (Berthet et Amar-Costesec, 2006 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Enfin, le dernier type est le cycle de vie haplophasique (Berthet et Amar-Costesec, 2006 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Il s'agit, par exemple, de l'algue *Chlamidomonas* (Campbell et Reece, 2007). Dans ce cas, les gamètes fusionnent pour

former un zygote qui subit directement une méiose. Cette méiose ne donne pas naissance à des gamètes mais à une cellule haploïde ou spore (terme utilisé par Karp, 2010) qui, par mitose, va donner un organisme multicellulaire haploïde (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012) ou plusieurs organismes unicellulaires haploïdes (Reece *et al.*, 2012). Cet organisme haploïde pourra plus tard, grâce à la mitose, former des cellules qui vont devenir des gamètes. La phase diploïde ne dure donc, dans ce cas, qu'un court laps de temps (Berthet et Amar-Costesec, 2006 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

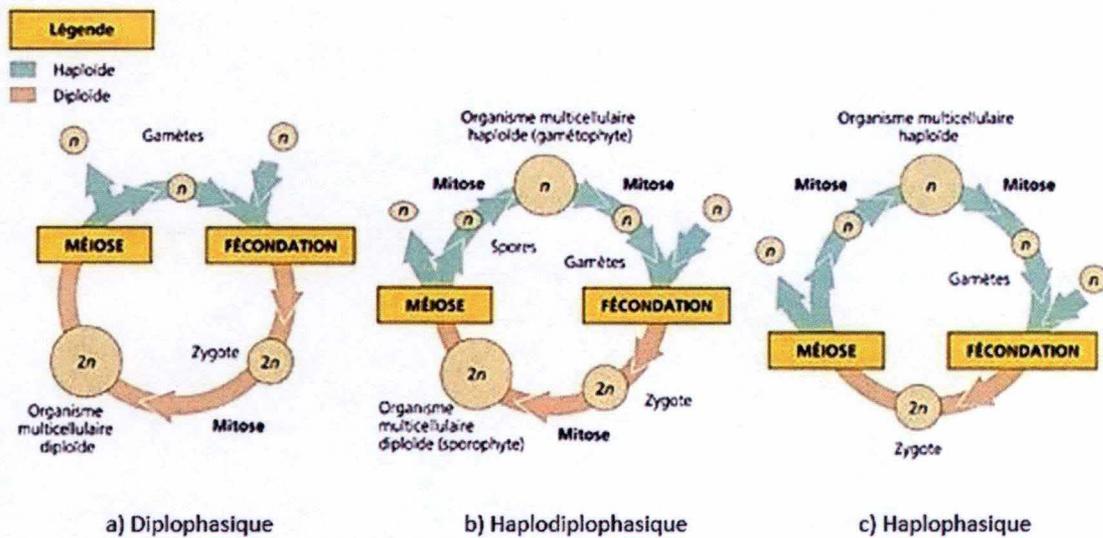


Figure 7: Les différents cycles de développement (modifié à partir du Campbell et Reece, 2007)

2. Diversité de divisions non sexuées et sexuées

Une grande diversité de divisions non sexuées ou sexuées existe. Dans le cadre de ce mémoire, une division non sexuée a été considérée comme une division cellulaire qui ne soit pas méiotique, c'est-à-dire une division qui permet la formation d'une nouvelle cellule avec les mêmes caractéristiques génétiques que la cellule de base. Une division sexuée sera, quant à elle, une division qui donnera naissance à des cellules ayant des caractéristiques génétiques différentes.

La diversité de la division non sexuée peut tout d'abord concerner son but. Ainsi, la mitose « classique », telle qu'enseignée, est une mitose qui permet de renouveler des cellules mortes ou de réaliser les divisions qui permettent de passer du zygote à l'individu adulte (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Mais, il existe des divisions qui permettent de recréer un

nouvel organisme. C'est le cas des divisions non sexuées chez les organismes unicellulaires, dont la dénomination diffère entre livres de référence : simple division cellulaire, mitose ou scissiparité (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Chez les Végétaux, une ramification à partir de la plante mère via des stolons ou des rhizomes permet le développement d'une nouvelle plante (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Chez certains animaux (invertébrés), comme chez l'hydre par exemple, des bourgeons peuvent se former à partir de la face externe de l'organisme parent (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Ceux-ci deviendront de nouveaux organismes qui peuvent se détacher ou non, ce qui formera alors une colonie (coraux durs) (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Ensuite, à côté du modèle classiquement enseigné, qui est celui d'un grand nombre d'eucaryotes Animaux et Végétaux, d'autres types de divisions non sexuées existent (Figure 8). Premièrement, chez les Bactéries et Archéobactéries, la cellule se divise en deux en séparant les origines des chromosomes fils dans les deux futures cellules. Deuxièmement, il existe ce que l'on appelle des mitoses fermées, dans lesquelles l'enveloppe nucléaire ne disparaît pas. Dans ce cas, soit le fuseau traverse le noyau, et permet, par sa position, de déterminer le sens de la division du noyau. Les chromosomes s'attachent à l'enveloppe nucléaire. C'est le cas des Dinoflagellés et des Protistes unicellulaires. Soit, le fuseau est à l'intérieur du noyau comme chez les Diatomées et Eumycètes, avec les microtubules fixant les chromosomes pour les séparer (Berthet et Amar-Costesec, 2006 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Raven *et al.* (2014) décrivent un autre type de mitose dans laquelle des centrosomes sont présents et forment le fuseau. Celui-ci traverse le noyau et fixe les chromosomes (Raven *et al.*, 2014). Il y a également de la diversité concernant le niveau où se produit la division. Il existe, en effet, des divisions symétriques et asymétriques. Pensons, par exemple, au bourgeonnement des levures (Barral, 2003).

Enfin, des mitoses sans cytokinèse peuvent se produire, il s'agit d'endomitoses (Pawlikowska *et al.*, 2014).

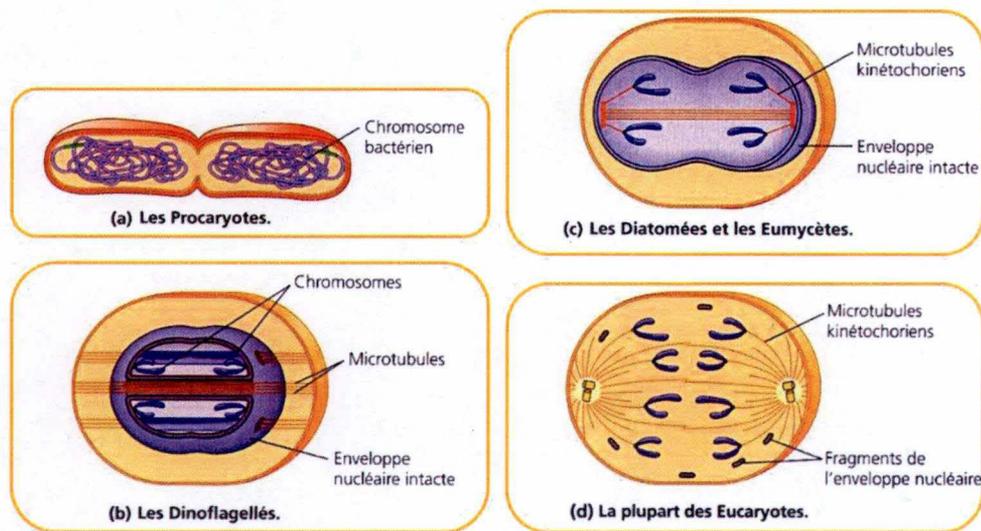


Figure 8: Les différents types de mitose (modifié à partir du Campbell et Reece, 2007)

De la diversité dans les divisions sexuées peut aussi être rencontrée. Tout d'abord, la fonction n'est pas toujours la même. Dans le cas de la méiose classiquement enseignée, il y aura formation de 4 cellules haploïdes à partir d'une cellule diploïde, en vue de la fécondation. Néanmoins, la méiose produit chez certains organismes des spores qui deviendront des individus (voir le point Cycles de développement des organismes).

Ensuite, il existe également de la diversité dans la manière dont est réalisée la méiose. En dehors du modèle classiquement enseigné et qui sera détaillé dans le cadre de ce mémoire, il existe par exemple l'endoméiose, dans laquelle ne se produit pas de séparation des cellules à la fin de la première méiose. Cela permet aux organismes effectuant de la parthénogénèse de façon cyclique d'obtenir des recombinaisons via les crossing over (Berthet et Amar-Costesec, 2006).

Au vu de la diversité dans les types de cycle de développement et dans les divisions sexuées et non sexuées, il apparaît clairement que l'enseignement des concepts de base doit se focaliser sur un seul modèle, qui sera dans le cadre de ce mémoire, celui des Animaux classiquement enseigné en secondaire.

C. Cycle cellulaire

Le cycle cellulaire est la succession des différentes étapes se produisant depuis la création de la cellule par division cellulaire jusqu'à sa propre division. Ce cycle est divisé en une interphase et en une phase M qui sont elles-mêmes subdivisées en différentes phases (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 9).

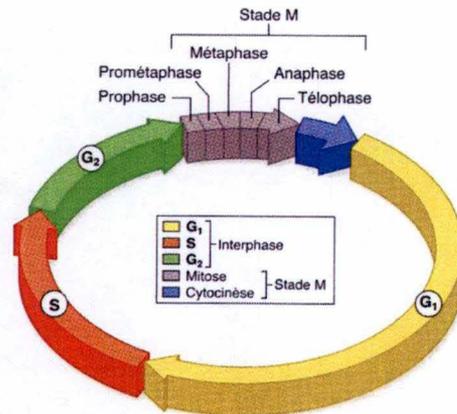


Figure 9: Les différentes étapes du cycle cellulaire (Raven *et al.*, 2014)

1. L'interphase

Selon certains livres, l'interphase est l'étape la plus longue car elle occupe 90 % du cycle cellulaire (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 9). Il s'agit du moment où la cellule grandit grâce à la production des protéines et des organites. Trois phases distinctes y sont décrites, à savoir la phase G₁, la phase S et la phase G₂ (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012).

C'est durant la phase S que se déroule la réplication de l'ADN. Celle-ci débute au niveau d'origines de réplication, les deux brins d'ADN y sont séparés, formant ainsi un œil de réplication. Les extrémités des yeux de réplication sont nommées fourche de réplication. Une primase y synthétise une amorce d'ARN. Puis, à partir de celle-ci, l'ADN polymérase ajoute un nouveau nucléotide complémentaire du brin d'ADN en cours de réplication, et ce, toujours à l'extrémité 3' hydroxyle. Étant donné que les deux brins de l'ADN sont antiparallèles, un brin est synthétisé en continu et l'autre pas (fragments d'Okazaki). Cette réplication est dite semi-conservative (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012).

Des cohésines se mettent en anneaux tout le long des deux chromatides sœurs formées après la réplication afin de les maintenir ensemble (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 10). Selon d'autres livres, les cohésines sont situées tout le long des chromatides mais ensuite, au moment de la condensation en mitose ou en fin de métaphase I en méiose, elles ne sont plus présentes qu'au niveau des centromères (Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014).

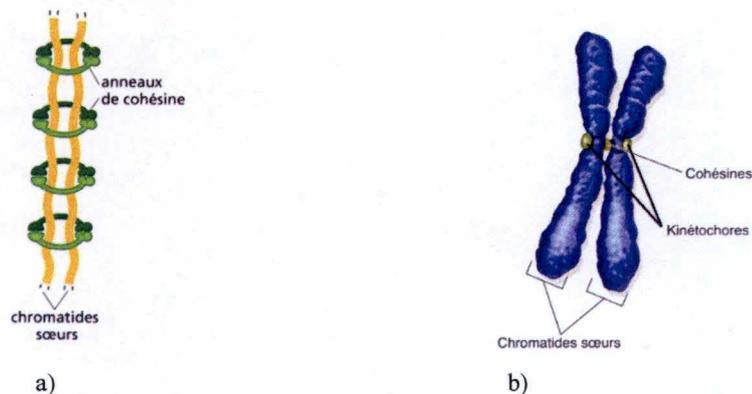


Figure 10: Différents modèles de la liaison des chromatides sœurs grâce à la cohésine (a) Alberts *et al.*, 2012 ;
b) Raven *et al.*, 2014

Durant l'interphase se produit également la duplication du centrosome (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012).

Des différences de durée du cycle cellulaire existent entre types de cellules ou entre organismes, elles sont surtout à imputer à la phase G1 (Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012). En effet, à ce moment, les cellules peuvent faire une pause et même rentrer en G0 qui est un stade de repos pouvant durer plusieurs jours ou années. Les cellules musculaires et hépatiques, par exemple, sont en G0. Les cellules hépatiques ont, néanmoins, la possibilité de revenir au stade G1 (Raven *et al.*, 2014).

2. La division cellulaire

2.1 Phase M

La phase M comporte quant à elle 2 étapes, la mitose et la cytokinèse (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012). Le moment où cette dernière débute n'est pas toujours le même en fonction du livre. Selon certains, elle commence en anaphase (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010). D'autres précisent juste qu'elle commence dans les dernières étapes de la mitose (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Raven *et al.* (2014) la situe, quant à eux, après la mitose.

2.1.1 Les différentes étapes de la mitose

La mitose est un processus se déroulant en continu, mais, pour faciliter la compréhension, elle a été divisée en 5 stades : la prophase, la prométaphase, la métaphase, l'anaphase et la télophase (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

a) Prophase

La chromatine se condense en chromosomes (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Les nucléoles disparaissent progressivement (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012).

Les centrosomes migrent du noyau vers les extrémités de la cellule et à partir de ceux-ci irradient les microtubules qui forment le fuseau de division (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012; Figure 11).

Une fragmentation de l'enveloppe nucléaire se produit grâce à la phosphorylation des protéines des pores nucléaires et des filaments intermédiaires de la lamina nucléaire (Alberts *et al.*, 2012). Certains décrivent ce fractionnement comme progressif, commençant en prophase et se terminant en prométaphase (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Certains le décrivent en début de prométaphase (Alberts *et al.*, 2012). D'autres enfin, le positionnent au moment de la prophase (Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014).

Une fragmentation de l'appareil de Golgi et du réticulum endoplasmique se produit (Karp, 2010; Raven *et al.*, 2014).

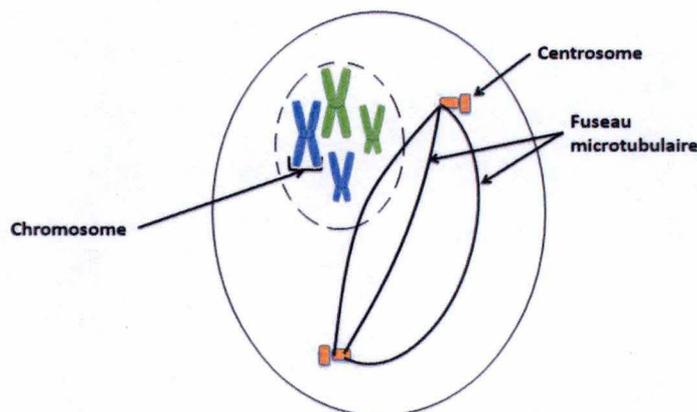


Figure 11: La prophase (réalisé via Powerpoint)

b) Prométaphase et métaphase

La fragmentation du noyau permet aux microtubules kinétochoriens d'interagir avec les chromosomes au niveau des kinétochores (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Un mouvement de va et vient des chromosomes se produit alors, puisque chaque kinétochore est accroché à des microtubules du pôle opposé. Mais, le mouvement global dirige les chromosomes vers l'équateur (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Campbell et Reece (2007) et Reece *et al.* (2012) mentionnent que les chromosomes sont toujours en voie de condensation durant cette phase.

Les chromosomes s'alignent ensuite sur la plaque équatoriale ou métaphasique qui est un plan imaginaire situé au niveau de l'équateur du fuseau. Il s'agit de la métaphase (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012; Figure 12).

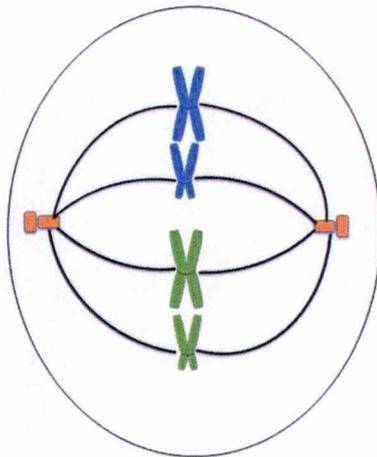


Figure 12 : La métaphase (réalisé via Powerpoint)

Certains auteurs disent que même à ce moment, les chromosomes sont toujours en mouvement et ont une petite tendance à être ballotés entre les deux pôles de la cellule (Alberts *et al.*, 2012).

c) Anaphase

L'anaphase est divisée en deux sous étapes, à savoir l'anaphase A et l'anaphase B, qui correspondent chacune à un phénomène précis (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). En réalité, ces deux sous étapes se passent

plus ou moins en même temps (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Figure 13).

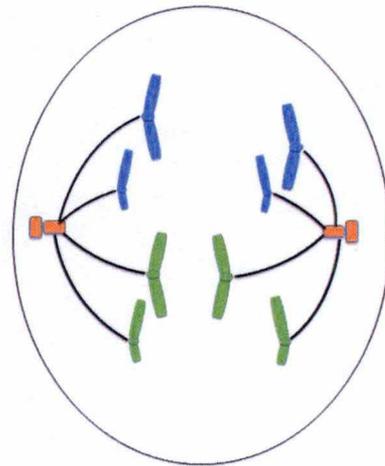


Figure 13 : L'anaphase (réalisé via Powerpoint)

Durant l'anaphase A, les chromatides sœurs se séparent grâce à la destruction des liens de cohésines (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Ceux-ci sont coupés grâce à une séparase qui était auparavant inactivée par une protéine inhibitrice appelée sécurine (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*,2012). Mais, cette dernière est détruite en début d'anaphase par le complexe de promotion de l'anaphase ou APC (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010; Raven *et al.*, 2014 ; Figure 14).

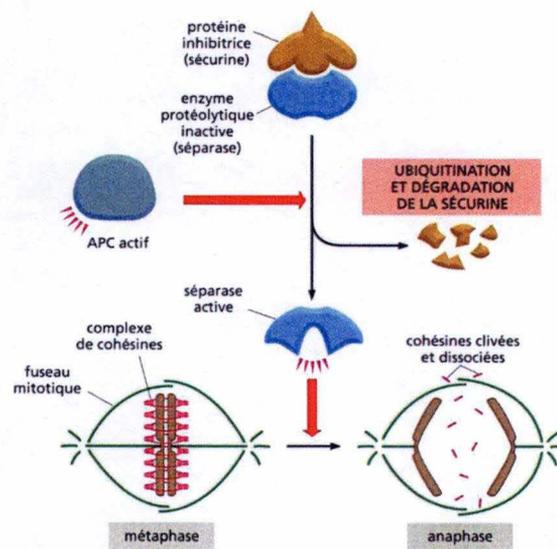


Figure 14: Activation de la séparase (Alberts *et al.*, 2012)

Les chromatides migrent alors chacune vers un pôle (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012). On parle, à ce moment, de chromosomes (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012). Cela s'appelle la ségrégation (Alberts *et al.*, 2012). Ce mouvement serait médié par des protéines motrices qui transportent le chromosome le long du microtubule pour rejoindre le pôle de la cellule le plus proche (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012). De concert, les microtubules kinétochoriens se dépolymérisent (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 15).

Durant l'anaphase B, des protéines motrices font glisser les microtubules polaires les uns par rapport aux autres de sorte que la région de chevauchement entre eux diminue progressivement. Ils restent néanmoins chevauchés car une polymérisation a lieu en même temps au niveau de cette zone de chevauchement. (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 15). Les microtubules sont ainsi poussés vers les pôles, ce qui permet l'allongement de la cellule (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014; Reece *et al.*, 2012).

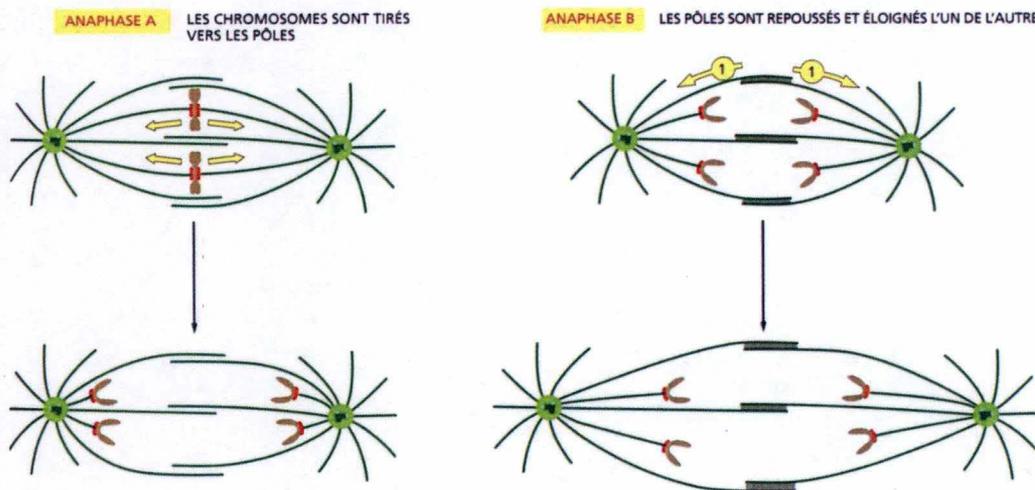


Figure 15: Mouvement des microtubules en anaphase A et B (Alberts *et al.*, 2012)

d) Télaphase

Durant la télaphase, le fuseau de division disparaît (Figure 16). Les protéines des pores nucléaires et les lamines qui avaient été phosphorylées sont déphosphorylées afin de recréer la lamina (Alberts *et al.*, 2012) et les enveloppes nucléaires aux deux pôles (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Ces enveloppes

se reforment en utilisant les anciens fragments (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007) ainsi que des membranes supplémentaires (Campbell et Reece, 2007).

Les chromosomes se décompactent (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012) permettant la reprise de l'activité de transcription (Alberts *et al.*, 2012 ; Raven *et al.*, 2014).

Les nucléoles se reforment (Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012), de même que le réticulum endoplasmique et le Golgi (Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014).

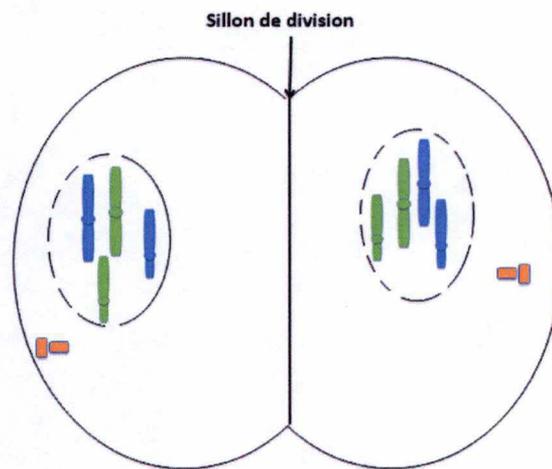


Figure 16: La télophase (réalisé via Powerpoint)

2.1.2 Cytocinèse

La cytocinèse est la division d'une cellule mère en deux cellules filles distinctes. Un étranglement apparaît au niveau de l'ancienne plaque équatoriale, on l'appelle sillon de division ou de clivage. À son niveau se trouve un anneau contractile (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Il est composé de filaments de myosine et de filaments d'actine qui se chevauchent. Les filaments d'actine vont glisser sur les filaments de myosine créant ainsi une force de contraction afin de rétrécir le diamètre de l'anneau jusqu'à la formation de deux cellules distinctes (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012).

2.2 Méiose

2.2.1 Méiose I ou division réductionnelle

Le terme « division réductionnelle » est utilisé par Campbell et Reece (2007), Raven *et al.* (2014) et Reece *et al.* (2012).

a) Prophase I

La chromatine se condense progressivement (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Les chromosomes se présentent sous forme de chromatides sœurs reliées au niveau du centromère par les cohésines (Alberts *et al.*, 2012 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Les chromosomes homologues vont s'apparier sur toute leur longueur (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012), formant ce que l'on appelle un « bivalent » (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010; Raven *et al.*, 2014) ou « tétrade » (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010; Raven *et al.*, 2014). Cet appariement est maintenu grâce à un complexe de protéines que l'on appelle le « complexe synaptonémal ». C'est à ce moment que se produisent les recombinaisons entre chromosomes homologues qui sont des échanges de portions d'ADN correspondantes entre chromatides non sœurs (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012; Figure 17). Différents noms sont donnés à ce phénomène : crossing-over (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014), recombinaison génétique (Karp, 2010) ou enjambement (Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012).

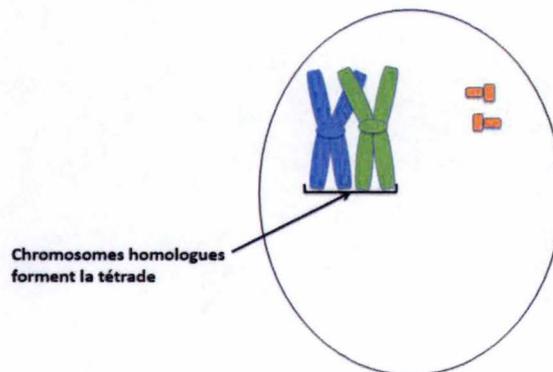


Figure 17: Crossing over entre chromosomes homologues (réalisé via Powerpoint)

Une fois les crossing-over réalisés, ce complexe synaptonémal disparaît. Les deux chromosomes homologues ne sont plus alors liés entre eux qu'au niveau de chiasma(s) qui sont les endroits où ont eu lieu les enjambements. Plusieurs enjambements sont possibles au niveau

de deux chromosomes homologues, de 1 à 3 en fonction du livre de référence (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Toute tétrade présente au moins un chiasma afin de s'assurer que les deux chromosomes homologues seront correctement répartis entre les deux cellules filles. En effet, le chiasma évite qu'après la disparition du complexe synaptonémal et suite aux forces exercées par les microtubules vers les pôles opposés, les chromosomes homologues ne se séparent avant l'anaphase I (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014).

Les centrosomes migrent vers les extrémités de la cellule en formant les faisceaux de microtubules (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). L'enveloppe nucléaire disparaît progressivement (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012), de même que les nucléoles (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010).

À la fin de la prophase, les microtubules des deux pôles s'attachent au niveau des deux kinétochores de chaque chromosome homologue (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Cette étape est décrite dans certains livres au moment de la métaphase I (Raven *et al.*, 2014).

b) Métaphase I

Cette étape consiste en l'alignement des paires de chromosomes homologues au niveau de la plaque équatoriale. Chacun est attaché à des microtubules venant d'un des deux pôles de la cellule. Leur position est totalement aléatoire, ainsi, les chromosomes paternels ne vont pas tous vers une cellule, et les maternels vers l'autre cellule. La répartition entre les deux futures cellules se fait au hasard, c'est ce que l'on appelle le réarrangement aléatoire (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 18). Par exemple, chez l'Homme qui présente 23 paires de chromosomes, il y a 2^{23} combinaisons différentes possibles, c'est-à-dire environ 8 millions de cellules différentes possibles (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012).

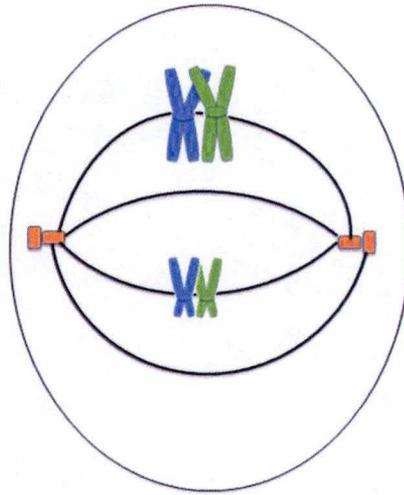


Figure 18: La métaphase I (réalisé via Powerpoint)

c) Anaphase I

Les chromosomes homologues sont chacun tirés vers un pôle de la cellule par les microtubules. Les chromatides sœurs restent donc ici attachées l'une à l'autre contrairement à ce qu'il se passe durant la mitose (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 19).

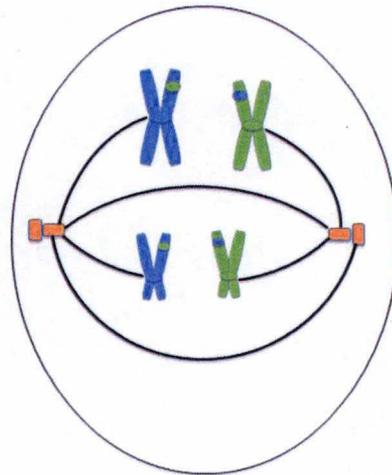


Figure 19: L'anaphase I (réalisé via Powerpoint)

d) Télaphase I et cytokinèse

Tout comme pour la mitose, des disparités existent quant au moment où la cytokinèse débute. La séparation en deux cellules se fait selon les mêmes modalités que lors de la mitose, à savoir qu'un sillon de division se forme et finit par diviser la cellule en deux cellules (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 20).

Parfois, chez certaines espèces, l'enveloppe nucléaire (Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012) ainsi que les nucléoles réapparaissent (Campbell et Reece, 2007), et les chromosomes se décondensent (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010; Reece *et al.*, 2012). Toutefois, la décondensation n'est pas aussi prononcée qu'en interphase (Karp, 2010).

À ce moment, chaque cellule est haploïde mais les chromosomes possèdent toujours deux chromatides sœurs (Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Aucune réplication ne se produit donc entre les deux méioses (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012 ;).

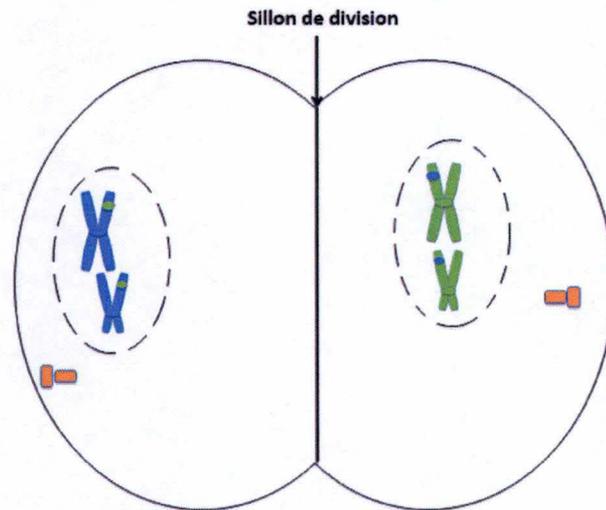


Figure 20: La télaphase I (réalisé via Powerpoint)

2.2.2 Méiose II ou division équationnelle

Le terme « division équationnelle » est utilisé par Campbell et Reece (2007) et Reece *et al.* (2012).

a) Prophase II

Durant cette étape, les centrosomes se dédoublent et migrent chacun vers une extrémité de la cellule en formant le fuseau de division (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

Les chromosomes fixés par des microtubules au niveau de leurs kinétochores, migrent vers la plaque équatoriale, en fin de prophase II (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Reece *et al.*, 2012). Tout comme durant la méiose I, certains livres mentionnent cette migration en métaphase II (Raven *et al.*, 2014).

b) Métaphase II

La métaphase est l'étape où les chromosomes sont alignés sur la plaque équatoriale (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012 ; Figure 21).

Il est intéressant de noter qu'ici, à l'inverse de la mitose, les chromatides sœurs ne sont plus identiques en tout point étant donné l'étape d'enjambement qui s'est produite durant la méiose I et qui a permis l'échange de portions d'ADN entre chromosomes homologues (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

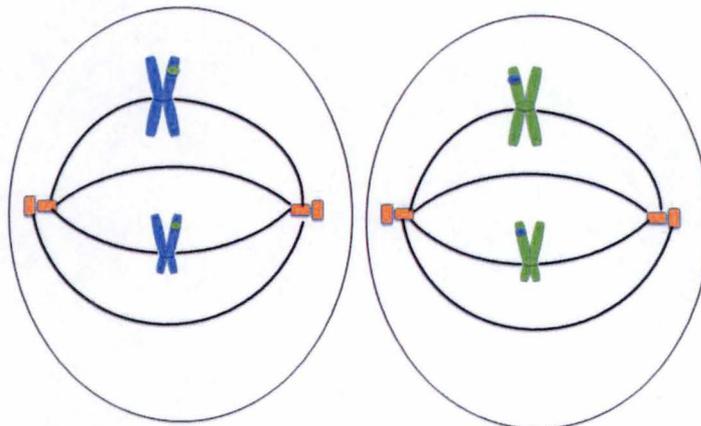


Figure 21: La métaphase II (réalisé via Powerpoint)

c) Anaphase II

À ce moment, les chromatides sœurs sont séparées suite à la séparation des centromères (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012) par la dégradation des cohésines qui les maintenaient ensemble (Alberts *et al.*, 2012 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012). Les chromatides se dirigent vers un des deux pôles de la cellule (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Figure 22).

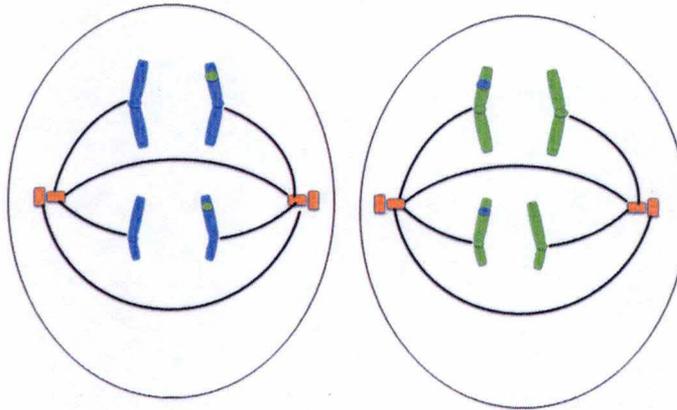


Figure 22: L'anaphase II (réalisé via Powerpoint)

d) Télaphase II et cytokinèse

À la suite de la télaphase (Figure 23) et de la cytokinèse, 4 cellules haploïdes avec les noyaux reformés et les chromosomes décondensés sont formées. Ces 4 cellules sont toutes différentes génétiquement les unes des autres et de la cellule mère (Alberts *et al.*, 2012 ; Campbell et Reece, 2007 ; Karp, 2010 ; Raven *et al.*, 2014 ; Reece *et al.*, 2012).

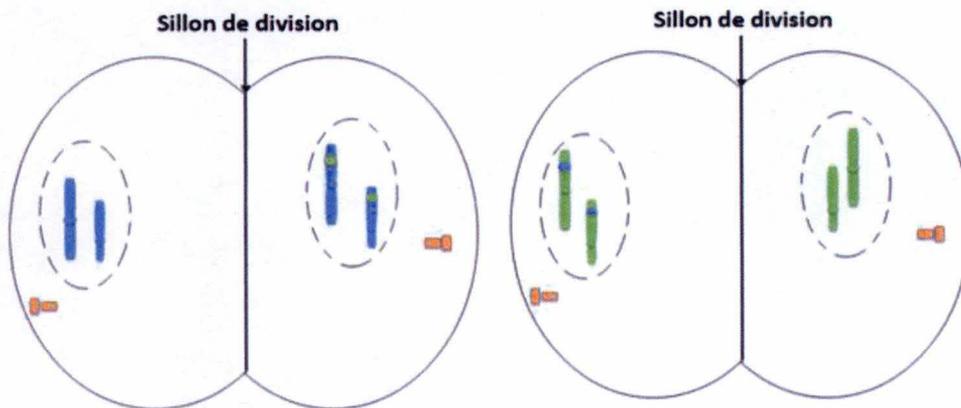


Figure 23: La télaphase II (réalisé via Powerpoint)

II. Recensement des concepts problématiques et des erreurs conceptuelles des élèves décrits dans la littérature

L'étude des erreurs conceptuelles fréquemment commises par les élèves dans les processus de mitose et de méiose a pour but de pouvoir orienter les syllabi ou les professeurs sur les points posant le plus de problème. L'enseignement de ces matières sera ainsi plus efficace. De plus, la bonne compréhension des processus de mitose et de méiose permettra aux élèves d'appréhender plus facilement des matières enseignées ultérieurement telles que l'hérédité et la reproduction (Dikmenli, 2010 ; Williams *et al.*, 2011). La littérature a ainsi été explorée afin d'identifier les erreurs conceptuelles mises en évidence concernant ces processus. Ces erreurs ne concernent pas toujours une majorité d'élèves, mais, elles ont pu être observées dans un certain nombre de cas. Il est également important de spécifier que parmi les élèves capables de répondre correctement à la question, certains ne sont pas capables de justifier de façon adéquate leur réponse (Chattopadhyay, 2012 ; Lewis *et al.*, 2000). Ces lectures ont ainsi révélé que cette problématique semble la même quel que soit le pays étudiant les erreurs conceptuelles (Turquie (Çimer, 2012 ; Dikmenli, 2010 ; Kara et Yeşilyurt, 2008 ; Ozcan *et al.*, 2012), Inde (Chattopadhyay, 2012), Canada (Kalas *et al.*, 2013), Slovénie (Strgar et Faculty, 2013), Etats Unis (Newman *et al.*, 2012), Royaume-Unis (Lewis *et al.*, 2000)).

Une distinction va, ici, être effectuée entre les confusions de termes et les erreurs conceptuelles à proprement parlé (Tableau 2). Les pourcentages d'élèves qui réalisent ces erreurs sont présentés dans l'Annexe 2.

En ce qui concerne les erreurs conceptuelles, certaines révèlent que les généralités sur les processus de la mitose et de la méiose ne sont pas toujours acquises. Par exemple, les élèves ont des difficultés à différencier ces deux processus en termes de conservation/changements génétiques (Chattopadhyay, 2012 ; Kara et Yeşilyurt, 2008 ; Lewis *et al.*, 2000 ; Lewis et Wood-Robinson, 2000), et de nombre de cellules en fin de processus (Atilboz, 2004). Ils ont également des difficultés à les localiser, l'un dans les tissus somatiques et l'autre dans les gonades (Chattopadhyay, 2012 ; Kara et Yeşilyurt, 2008 ; Lewis *et al.*, 2000 ; Lewis et Wood-Robinson, 2000 ; Ozcan *et al.*, 2012). Certains élèves ne connaissent pas les rôles de ces deux processus (Kara et Yeşilyurt, 2008 ; Williams *et al.*, 2011). Le résultat de la méiose est, ainsi, pour certains élèves, une cellule diploïde (Dikmenli, 2010). De plus, les élèves ont également tendance à intervertir les noms d'étapes et ce qu'il s'y passe (Dikmenli, 2010).

Ensuite, le concept de chromosome pose problème sous différents aspects. Tout d'abord, les élèves ne font pas le lien entre les chromosomes, l'ADN, les gènes, les allèles ainsi que l'information génétique, c'est-à-dire entre des matières vues à différents moments (Atilboz, 2004 ; Chattopadhyay, 2012 ; Kalas *et al.*, 2013 ; Lewis *et al.*, 2000 ; Lewis et Wood-Robinson, 2000 ; Newman *et al.*, 2012 ; Ozcan *et al.*, 2012). Ensuite, le nombre de chromosomes présents à la fin de la mitose et de la méiose est une question difficile pour les élèves (Chattopadhyay, 2012 ; Dikmenli, 2010 ; Kara et Yeşilyurt, 2008 ; Lewis *et al.*, 2000 ; Lewis et Wood-Robinson, 2000 ; Ozcan *et al.*, 2012). Certains mentionnent ainsi que le nombre de chromosomes ne change pas après la méiose I mais est divisé par deux suite à la méiose II, ou que le nombre est doublé durant la prophase puis divisé par deux en anaphase (Dikmenli, 2010). La forme des chromosomes à la fin de ces deux processus pose également problème (Atilboz, 2004), puisque certains élèves pensent que les chromosomes sont toujours constitués de deux chromatides durant la division d'une cellule (Dikmenli, 2010), ou que la forme normale du chromosome est la forme répliquée (Kalas *et al.*, 2013). Ils veulent alors maintenir cette forme de « X » et réassemblent, par exemple, les chromatides simples du père et de la mère pour former un chromosome double (Newman *et al.*, 2012). Les concepts de la diploïdie et de l'haploïdie sont, eux aussi, difficilement compris par les élèves (Atilboz, 2004 ; Dikmenli, 2010 ; Kalas *et al.*, 2013). Certains pensent, en effet, que la ploïdie dépend du nombre de chromosomes ou de la forme répliquée ou non de ces derniers (Kalas *et al.*, 2013). Enfin, le nombre « n » semble un concept difficile puisque certains pensent que lorsque $2n=4$, cela signifie deux chromosomes composés chacun de deux chromatides sœurs (Dikmenli, 2010).

En outre, plusieurs erreurs conceptuelles sont liées au « timing ». Ainsi, la distinction entre le concept de cycle cellulaire et le concept de division cellulaire n'est pas toujours comprise (Dikmenli, 2010). Quelques élèves ne savent pas ce qu'il se passe durant l'interphase (Ozcan *et al.*, 2012), ou pensent que c'est une étape de la mitose (Dikmenli, 2010). Beaucoup d'élèves ne sont pas non plus capables de préciser correctement le moment où se produit la réplication (Dikmenli, 2010 ; Kalas *et al.*, 2013 ; Lewis *et al.*, 2000). Cette dernière est parfois positionnée entre l'anaphase et la télophase, entre les deux méioses (Dikmenli, 2010) ou après la cytokinèse, par exemple (Lewis *et al.*, 2000). De plus, le principe de cette réplication n'est pas toujours acquis. Dikmenli (2010) a, par exemple, mis en évidence que, suite à leur croyance que le chromosome est toujours sous forme de deux chromatides, certains élèves pensent que la réplication consiste à passer d'un chromosome en forme de « X » à deux chromosomes en forme de « X ».

En ce qui concerne spécifiquement la méiose, peu d'élèves mentionnent les crossing over ou le réarrangement aléatoire (Chattopadhyay, 2012 ; Newman *et al.*, 2012), de même que le concept d'allèle (Newman *et al.*, 2012 ; Ozcan *et al.*, 2012). Le concept de chromosome homologue pose également problème (Atilboz, 2004 ; Newman *et al.*, 2012). Selon Newman *et al.* (2012), les élèves auraient plus tendance à retenir que l'on obtient quatre cellules contenant la moitié du nombre de chromosomes de départ plutôt que de retenir les processus se produisant au sein des chromosomes (Newman *et al.*, 2012). Parmi ceux qui mentionnent néanmoins les crossing over, certains les positionnent durant la métaphase I (Dikmenli, 2010).

Avant de développer les confusions de termes, des erreurs conceptuelles plus secondaires peuvent être citées. Beaucoup d'élèves pensent, par exemple, que les plantes n'effectuent pas la mitose ou la méiose (Chattopadhyay, 2012 ; Kara et Yeşilyurt, 2008 ; Lewis *et al.*, 2000). Dans le cas de la mitose, cette erreur peut provenir du fait que certains n'ont pas acquis que tous les organismes sont faits de cellules et que donc, la mitose se produit chez les cellules animales mais aussi chez les plantes, les champignons et les bactéries (Strgar et Faculty, 2013). Dans le cas de la méiose, certains élèves pensent que, puisque les plantes sont incapables de se déplacer, elles sont incapables de se reproduire de façon sexuée (Lewis *et al.*, 2000). En ce qui concerne les mitochondries et chloroplastes, certains élèves pensent que ceux-ci, tout comme le noyau, se fragmentent durant la mitose ou la méiose pour réapparaître ensuite (Dikmenli, 2010).

Enfin, des confusions entre termes sont décrites dans la littérature. La première que l'on peut mentionner est celle entre les termes de mitose et de méiose. Ceux-ci se ressemblant fortement, les élèves éprouvent des difficultés à les différencier (Lewis *et al.*, 2000). Ils ont également tout simplement du mal à savoir ce que ces mots « mitose » et « méiose » signifient (Haambokoma, n.d.).

Les termes chromatides sœurs-chromosomes-chromosomes homologues sont, eux aussi, des termes fréquemment confondus par les élèves (Dikmenli, 2010 ; Kalas *et al.*, 2013 ; Tekkaya *et al.*, 2001). Certains mentionnent ainsi que, durant la mitose, les chromosomes homologues sont séparés en anaphase, contrairement aux chromatides sœurs qui ne sont, elles, pas séparées. D'autres encore, dans le cadre de la méiose, mentionnent une séparation des chromatides sœurs en anaphase I ou une séparation des chromosomes homologues en anaphase II (Dikmenli, 2010).

Dikmenli (2010) rajoute à ces termes ceux de chromatine et de faisceau de fibres. Certains élèves pensent, par exemple, que les fibres du fuseau vont raccourcir et s'épaissir pour former des chromosomes (Dikmenli, 2010).

D'autres termes sont également, de par leur similarité, fréquemment confondus, il s'agit des termes de centrosomes, centrioles et centromères. Ces derniers étant parfois associés à la formation du fuseau de division (Dikmenli, 2010). Enfin, les termes « répliquer », « diviser », « copier », « fragmenter », « multiplier », « partager » sont fréquemment utilisés dans la description des processus de la mitose et de la méiose. Mais, les élèves éprouvent des difficultés à savoir si ces mots se rapportent aux chromosomes ou à la cellule (Lewis *et al.*, 2000).

Tableau 2: Concepts problématiques dans la compréhension des processus de mitose et de méiose

Catégorie	Concepts problématiques
Généralités	<ul style="list-style-type: none"> • Différence entre mitose et méiose <ul style="list-style-type: none"> - Changements génétiques ou non - Nombre de cellules in fine • Localisation de ces deux processus • Rôle de ces deux processus • Correspondance entre nom de l'étape et le processus se déroulant à cette étape
Chromosome	<ul style="list-style-type: none"> • Le lien entre chromosome, ADN, information génétique, gène et allèle • Nombre de chromosomes après la mitose ou la méiose • Forme des chromosomes à la fin de ces deux processus • La ploïdie • Le nombre « n »
Timing	<ul style="list-style-type: none"> • Différence entre le cycle cellulaire et la division cellulaire • Interphase : ce qu'il s'y produit et le positionnement hors mitose-méiose • Moment de la réplication et son principe
Méiose	<ul style="list-style-type: none"> • Concepts de crossing over, réarrangement aléatoire, chromosomes homologues et allèles • Moment où se produisent les crossing over
Erreurs secondaires	<ul style="list-style-type: none"> • Mitose et méiose chez les plantes • Sort des mitochondries et chloroplastes durant la mitose et la méiose

III. La transposition didactique

Dans la partie introductive, déjà simplifiée, il a été montré que la diversité des réalités biologiques est nettement plus complexe que ce qu'il est nécessaire de communiquer pour enseigner les concepts de mitose et de méiose. La transposition didactique du savoir (Chevallard, 1985 ; Verret, 1975) est une étape indispensable pour transformer le savoir dit « savant » en un savoir compréhensible pour le public cible, et ce, en focalisant l'enseignement sur l'essentiel : tenter de couvrir trop de contenu empêchera l'apprentissage en profondeur. Le choix de ce qui sera explicité ou laissé dans une « boîte noire » dépend, notamment, du public cible et de l'objectif de l'enseignement (Clerc *et al.*, 2012 ; Perrenoud, 1998). La transposition n'est évidemment pas la même dans l'enseignement secondaire, de baccalauréat ou de master.

La transposition didactique est externe et interne. L'externe est réalisée lors du transfert du « savoir savant » vers les textes qui visent à décrire la matière à enseigner aux élèves, appelés « savoirs à enseigner ». Il s'agit des référentiels (Clerc *et al.*, 2012 ; Khaldi, 2010/2011 ; Perrenoud, 1998) établis par un groupe de professionnels et imposés par le ministère organisant l'enseignement, et des programmes. Selon Clerc (2006), Dessus et Carpanèse (2003) et Paun (2006), les manuels scolaires sont également le résultat de la transposition externe. En réalité, Tavignot (1995) positionne les manuels, comme un savoir intermédiaire, entre le « savoir à enseigner » et le « savoir enseigné » qui est le cours effectivement donné à l'élève. L'interne est, quant à elle, la transposition réalisée entre le savoir à enseigner et le savoir enseigné (Perrenoud, 1998). Elle concerne les choix que l'enseignant fera suivant des critères qui lui sont propres, comme le niveau de sa classe, ses propres limites dans la compréhension des concepts, l'importance relative qu'il donne à différentes parties du cours ou ses contraintes horaires, par exemple (Khaldi, 2010/2011, Perrenoud, 1998 ; Ravel, 2003).

Il s'agit d'un point essentiel puisque l'on peut précisément se demander si cette transposition, dans le cas de la mitose et de la méiose, est effectuée de façon adéquate ou non ?

IV. Objectifs

Outre l'élaboration d'une synthèse théorique solide sur les processus de mitose et de méiose et le recensement des erreurs conceptuelles décrites dans la littérature, ce mémoire a eu pour objectif de construire des cartes conceptuelles reprenant l'entièreté des concepts impliqués dans les processus de mitose et de méiose et les liens existant entre eux. Celles-ci fournissent un outil visuel donnant une information rapide sur l'organisation de la matière et peuvent être utilisées notamment pour créer une séquence de cours.

La démarche expérimentale qui a suivi a eu pour but d'élaborer un questionnaire permettant d'évaluer les erreurs conceptuelles commises par les élèves francophones. Celles-ci ont alors pu être comparées à la littérature. De plus, le questionnaire a permis de tester un outil de catégorisation des élèves.

Mais, au-delà de l'étude des erreurs commises et afin de créer ultérieurement une séquence de cours adaptée aux difficultés des élèves, les causes de ces erreurs doivent aussi être envisagées. Celles-ci ont été recherchées dans les manuels de secondaire des trois principaux éditeurs en Belgique ainsi que dans la littérature.

Partie 2 : Matériel et méthodes

I. Cartes conceptuelles

Le programme CmapTools a été utilisé afin de créer plusieurs cartes conceptuelles. Une première carte générale reprend les concepts qui gravitent autour de la mitose et de la méiose, tandis que les concepts directement impliqués dans les processus de mitose et de méiose ont, eux, été détaillés dans deux cartes distinctes. Dans ces dernières, les phénomènes se produisant durant la mitose ou la méiose sont résumés et reliés à l'étape correspondante, avec un code couleur particulier.

II. Questionnaire à destination de l'enseignement secondaire

A. Construction du questionnaire

Le questionnaire a été construit grâce à la lecture d'articles dont celui de Dikmenli (2010) et grâce à de multiples discussions avec des membres de l'Unité Méthodologique de la Didactique et de la Biologie ainsi qu'avec une professeure de Biologie de l'enseignement secondaire. Il a d'abord été soumis aux premiers baccalauréats en sciences biologiques de l'université de Namur (N=37), grâce auxquels des modifications ont été apportées (Annexe 3).

B. Description du questionnaire

1. Mitose

La première partie du questionnaire consiste à dessiner une cellule effectuant la mitose et à décrire ce processus à partir d'une feuille blanche. Les consignes sont ici de légender les schémas effectués et de démarrer d'une cellule contenant deux paires de chromosomes.

2. Méiose

La deuxième partie concerne la méiose. Celle-ci comporte des schémas simplifiés de 4 cellules dans lesquelles les centrosomes se sont dupliqués et ont migrés aux extrémités en créant entre eux le fuseau de division ; deux microtubules polaires et deux microtubules kinétochoriens sont ainsi schématisés. Chacune de ces cellules correspond à une étape de la méiose : la métaphase et l'anaphase I et II. Les élèves doivent y dessiner l'emplacement des chromosomes. Ils sont également invités à décrire par écrit le processus de la méiose.

3. Questions ouvertes

Enfin, la troisième partie comporte des questions ouvertes dont certaines sont à justifier afin d'éviter ou de déceler les éventuelles réponses données à l'aveugle. Ces dernières questions concernent différents concepts. Tout d'abord la réplication : quand se produit-elle et quels effets a-t-elle sur la quantité d'ADN, le nombre de chromosomes et le nombre de jeux de chromosomes. Ensuite, il est demandé à l'élève si toutes les cellules d'un homme à l'âge adulte se divisent. Il doit également citer plus particulièrement lesquelles effectuent la mitose et lesquelles effectuent la méiose. Enfin, une question concernant la survenue ou non de changements génétiques durant la méiose est demandée à l'élève.

C. Déroulement de l'évaluation

Le sondage a été réalisé dans des classes de 6^{ème} secondaire de l'enseignement général, orientation sciences générales, par leur enseignant ou nous-mêmes. Le temps consacré à la résolution du questionnaire est de 25 minutes. Celui-ci est divisé en trois parties de 10, 5 et 10 minutes qui sont distribuées séparément afin de ne pas donner des indices pour les premières parties. Aucune réponse n'était donnée aux éventuelles questions si ce n'est une précision concernant la dénomination « jeu de chromosomes », qu'ils ne comprenaient pas. L'indice « n » leur a été donné.

Neuf écoles ont réalisé l'expérience, néanmoins, seuls les résultats de sept d'entre elles ont été conservés pour un total de 170 élèves. La suppression de deux écoles s'est faite sur base pour la première, d'une non homogénéité du groupe (5^{ème} et 6^{ème} années, sciences générales et de base) et pour la seconde, de résultats farfelus et/ou relevant plus d'un travail de groupe que d'un travail individuel. Les élèves d'une école ont, eux, reçu l'entièreté du questionnaire en une fois. Étant donné qu'après analyse, il ne semble pas que cela ait eu une incidence, les résultats de cette école ont été conservés.

D. Correction du questionnaire

La grille d'évaluation a été réalisée avant correction mais réajustée à la lecture des copies d'élèves afin de dégager au mieux les informations pertinentes (Annexe 4).

1. Mitose

Les réponses données pour cette partie ont été différenciées en « Réponse correcte » ou « Compris », « Réponse incorrecte » ou « Non compris » et « Sans réponse ».

1.1 Catégorisation des schémas

La catégorisation a été effectuée en fonction de concepts estimés comme prépondérants : (i) l'alignement des chromosomes (idéalement en métaphase), (ii) une séparation des chromatides sœurs lors d'une étape subséquente et (iii) le destin des chromatides après cette séparation (absence de réplication ou d'assemblage des chromatides ; Tableau 3).

Tableau 3: Les différentes catégories d'élèves en fonction du schéma de la mitose

Numéro de catégorie	Description de l'erreur observée sur le schéma		
1	Aucun schéma ou celui d'une méiose		
2	Faute et/ou absence dans/de la métaphase ET l'anaphase		
3	Faute ou absence de la métaphase ou de l'anaphase		
4	Faute dans la télophase ou cytokinèse	4.1	Assemblage des chromatides pour former des chromosomes en forme de « X »
		4.2	Réplication des chromatides pour former des chromosomes en forme de « X »
5	Chromatides restent intactes Autre faute : absence de microtubules, par exemple		

1.2 Correction étape par étape

La classification précédente étant plus générale, il a été décidé d'inclure dans la grille d'évaluation une analyse du processus de mitose et interphase étape par étape.

Pour être considéré comme correct, le schéma d'une phase réalisé par l'élève devait être en tout point similaire à celui choisi comme étalon (Annexe 5). Ainsi, en interphase, le schéma doit comporter un noyau dont l'enveloppe nucléaire est intacte, de la chromatine en son sein et un centrosome. Lors de la prophase, doivent être présents : deux centrosomes, un fuseau en

formation, des chromosomes ainsi qu'une enveloppe nucléaire qui se fragmente. Lors de la métaphase, le fuseau doit être formé entre les deux centrosomes et les chromosomes, attachés aux microtubules, sont alignés sur la plaque équatoriale. En anaphase, les constituants sont les mêmes et les chromatides doivent être séparés. Enfin, en télophase, un sillon de division doit être présent, le fuseau a disparu, chaque future cellule a un centrosome et l'enveloppe se reforme autour des chromatides. À cette étape, un schéma présentant de la chromatine est accepté.

La correction des schémas prend également en compte l'utilisation du nom de l'étape, l'ordre dans lequel ces étapes sont dessinées ou citées, ainsi que la correspondance entre le nom de l'étape et ce qu'il s'y passe.

1.3 Concepts généraux

Toujours sur base du schéma de mitose réalisé par l'élève, une grille de correction concernant différents concepts est remplie (Tableau 4).

Tableau 4: Les différents concepts présents dans la grille d'évaluation de la mitose

Les microtubules (MT)	La forme de l'ADN	Le placement des chromosomes	Généralités
<ul style="list-style-type: none"> • Attachement des chromosomes aux MT • MT issus d'un centrosome • Différents types de MT : -aster -polaire -kinétochorien • Rayonnement des MT en faisceau 	<ul style="list-style-type: none"> • Condensation • Chromatine • Chromatides sœurs • Centromère • Réplication 	<ul style="list-style-type: none"> • Plaque équatoriale • Pôles 	<ul style="list-style-type: none"> • Formation de deux cellules filles identiques à la cellule mère • Cytocinèse • Invagination

2. Méiose

En ce qui concerne la correction des schémas de la méiose, une attention est portée sur la similarité entre les schémas de la méiose I et de la méiose II.

Ensuite, l'illustration de différents concepts a été vérifiée : le crossing over, l'association des chromosomes en tétrade et les chromosomes homologues. Plus précisément, l'illustration de chromosomes homologues était repérée par la présence de paires de chromosomes de tailles différentes. Enfin, l'utilisation du terme a également été prise en compte.

3. Questions ouvertes

La réponse donnée par l'élève à ces questions est cochée parmi un ensemble de réponses possibles qui ont été définies.

E. Analyse des résultats

Le logiciel R a permis d'analyser le nombre de concepts connus par élève en fonction de la catégorie. Après un test de Bartlett dont la p-valeur était de 0.8779⁴, une ANOVA puis un test de Tukey pour comparer les catégories deux à deux ont été effectués.

Des analyses descriptives ont également été réalisées afin de déterminer les concepts posant le plus problème dans cet enseignement, point qui pourra être comparé avec la littérature. Les pourcentages donnés dans ces analyses prennent en compte les élèves n'ayant pas répondu.

F. Étude de livres à destination des élèves du secondaire

Des livres à destination des élèves du secondaire, sciences générales, ont été étudiés. Il s'agit de livres publiés par les trois principaux éditeurs en Belgique : De Boeck, Plantyn et Van in. Les éventuelles erreurs s'y trouvant, les omissions, les descriptions pouvant prêter à confusion ou les points jugés positifs ont été relevés. Les points jugés positifs sont ceux se concentrant sur des concepts décrits dans la littérature comme problématiques pour les élèves.

⁴ L'hétérogénéité des variances n'a donc pas pu être démontrée.

Partie 3 : Résultats

I. Cartes conceptuelles

Les trois cartes construites dans le cadre de ce mémoire sur les processus de mitose et de méiose sont disponibles en Annexe 6.

II. Questionnaires à destination des secondaires

A. Mitose

1. Fréquence relative de chaque catégorie

28% des élèves ont correctement aligné les chromosomes, séparé les chromatides et dessiné des chromosomes sous forme simple en fin de mitose mais une quelconque autre erreur a été commise dans leurs schémas (catégorie 5). 20% des élèves commettent une erreur liée aux chromatides, la moitié les réplique (4.2) et l'autre moitié rassemble des chromatides non-sœurs (4.1). Egalement 20% des élèves ont commis une erreur dans la métaphase ou l'anaphase (catégorie 3). 25 autres pourcents d'élèves commettent, quant à eux, une erreur dans ces deux phases et/ou les omettent. Enfin, 7% des élèves n'ont réalisé aucun schéma ou des schémas de méiose (Figure 24).

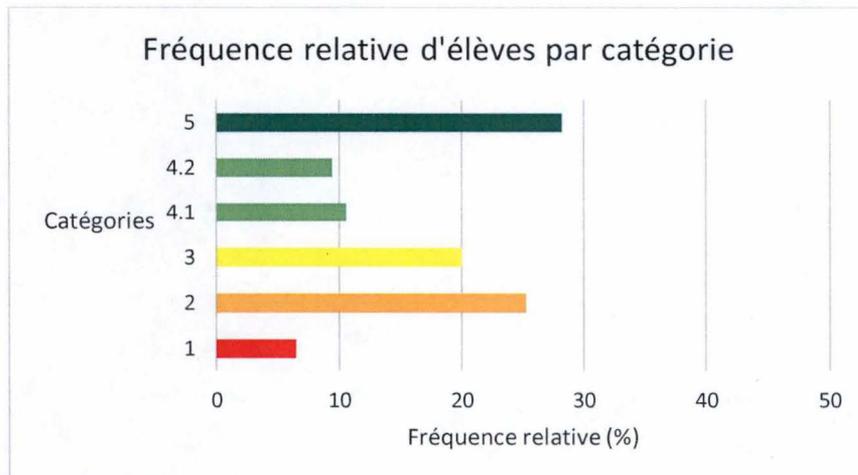


Figure 24: Diagramme de la fréquence relative d'élèves par catégorie (Catégories définies dans le matériel et méthodes ; N=170 élèves)

2. Nombre de concepts connus par catégorie et différences entre catégories

14 concepts sur les 16 évalués dans la grille correctrice des schémas de la mitose ont été pris en compte dans le cadre d'une analyse sur le lien entre le nombre de concepts connus par élève et la catégorie à laquelle il appartient. Les deux concepts supprimés sont ceux déjà pris en compte dans la catégorisation à savoir l'alignement des chromosomes et le concept des chromatides sœurs.

Une grande variabilité au sein de chaque catégorie en termes de nombre de concepts connus a été mise en évidence (Figure 25). Seules les catégories 1 et 2 contiennent des élèves qui ne connaissent aucun concept, ce qui est logique pour la catégorie 1 étant donné qu'elle fait notamment référence à une absence de schéma. En ce qui concerne les catégories supérieures, aucun élève ne connaît moins de 2 concepts. De plus, sur l'ensemble des élèves, aucun n'a restitué les 14 concepts. Il est également intéressant de noter que certains des élèves placés dans la catégorie 5, par exemple, connaissent aussi peu de concepts que des élèves de la catégorie 1 et inversement.

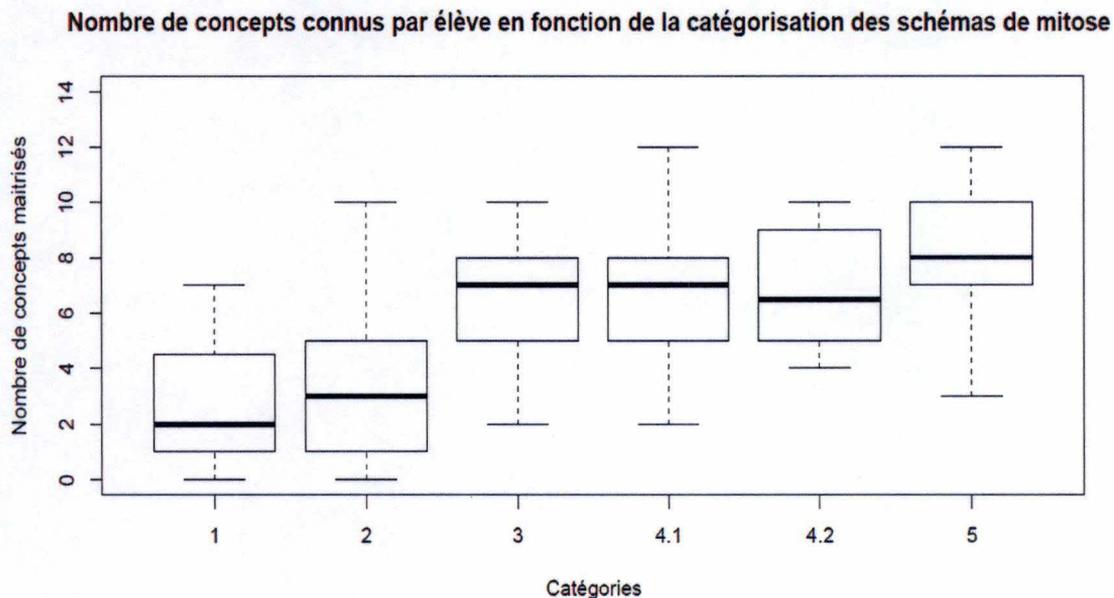


Figure 25: Diagramme en moustache du nombre de concepts connus par élève dans chaque catégorie (N : Catégorie 1=11 élèves ; 2=43 ; 3=34 ; 4.1=18 ; 4.2=16 ; 5=48)

Toutefois, les élèves de catégorie 5 maîtrisent en moyenne un nombre de concepts plus élevé que ceux des catégories 1, 2 et 3 (ANOVA : p-valeur < 0.001 ; Tukey) (Tableau 5).

Tableau 5: Moyenne et écart-type du nombre de concepts connus par élève et par catégorie ; catégories non significativement différentes l'une de l'autre

Catégorie	Moyenne	Écart-type	Regroupement des catégories suite au test de Tukey
1	3.4	2.8	a
2	3.7	2.8	a
3	7.4	2.7	b
4.1	7.9	2.3	bc
4.2	8.9	2.2	bc
5	9.9	2.1	c

3. Compréhension des différentes étapes de la mitose

Seul un faible pourcentage d'élèves comprend ce qu'il se passe spécifiquement à chaque étape de la mitose. La métaphase et l'anaphase semblent être les étapes les mieux maîtrisées par les élèves, bien que le pourcentage de compréhension y soit également faible (Figure 26A). Une majorité des élèves, néanmoins, est capable de restituer les noms des étapes, à l'exception de l'interphase, mais, celle-ci ne faisant pas partie de la mitose, il est normal qu'elle ait été peu mentionnée (Figure 26B). De plus, seule la moitié des élèves est capable de faire un parallèle entre le nom de l'étape de la mitose et ce qu'il s'y passe (Figure 26C). Enfin, la moitié des élèves a su remettre les étapes dans le bon ordre (Figure 26D). En outre, un cinquième des élèves a mentionné l'interphase dans cette question.

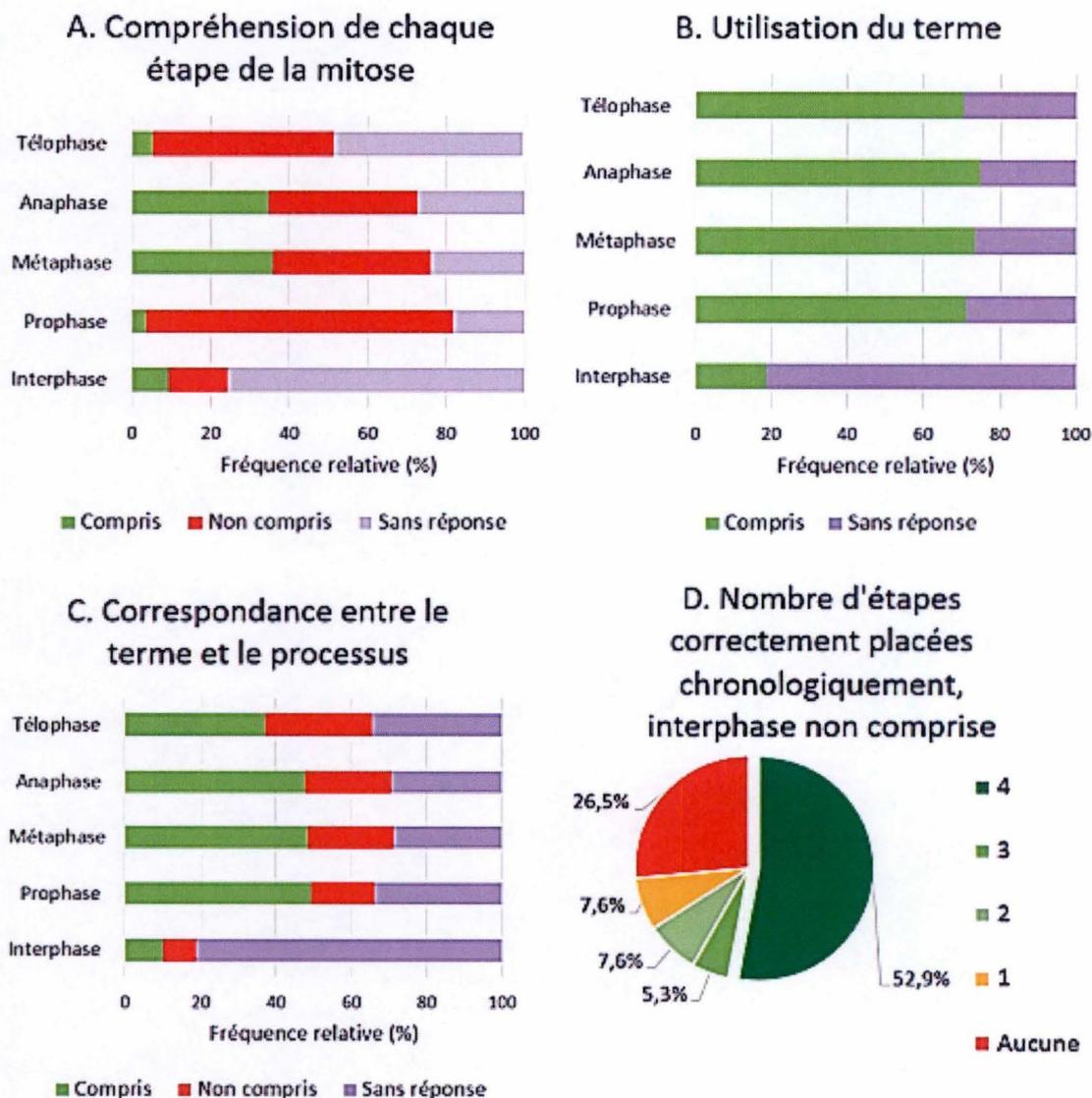


Figure 26 : Diagrammes représentant les fréquences relatives de la compréhension, des termes utilisés, de la correspondance et de l'ordre des phases (N=170)

4. Compréhension des différents concepts de la mitose

De 62% à 72% des élèves comprennent le concept de pôle, ont assimilé que les microtubules émanent d'un centrosome pour former un fuseau et que ces microtubules permettent de fixer les chromosomes. Ils ont également compris que ces derniers s'alignent durant une étape de la mitose et que celle-ci a pour conséquence la séparation en deux cellules. De 46 à 55% ont, eux, compris que les deux cellules filles résultantes sont identiques, que cette séparation débute par une invagination et que les chromosomes répliqués se séparent en chromatides. Les microtubules kinétochoriens semblent avoir une meilleure rémanence que les concepts de

microtubules de l'aster et interpolaires qui ne sont, la plupart du temps, pas mentionnés. Le centromère ne semble pas non plus être un concept acquis. Enfin, les concepts de chromatine, de réplication et de condensation ont été mentionnés par environ 25% des élèves (Figure 27).

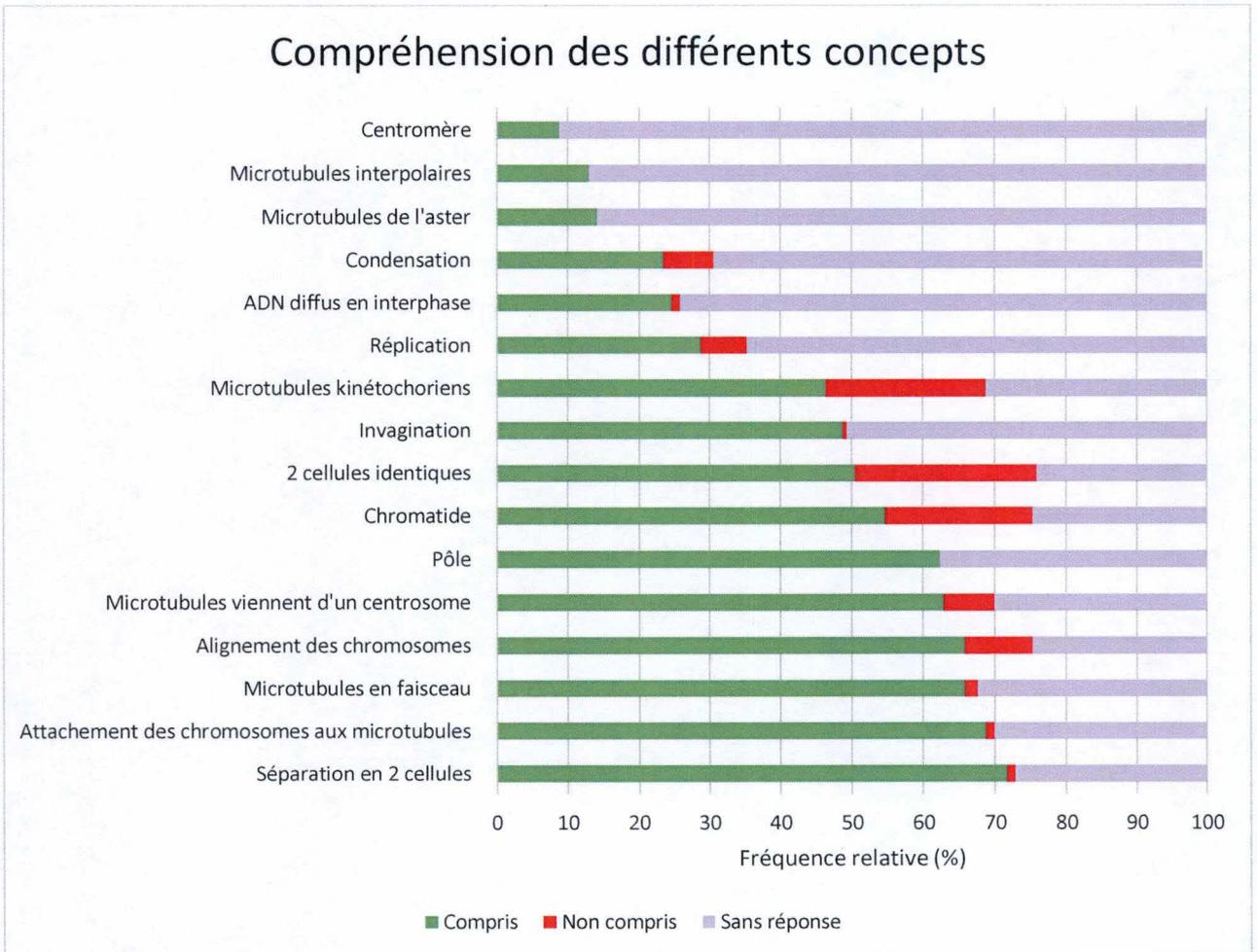


Figure 27: Diagramme de la fréquence relative de la compréhension, non compréhension ou non réponse à différents concepts par les élèves (N= 170 élèves)

B. Méiose

17 % des élèves ont su positionner correctement les chromosomes sur les schémas de la méiose à compléter.

5% des élèves dessinent deux mitoses successives, c'est-à-dire un alignement des chromosomes et une séparation des chromatides, à la fois en méiose I et en méiose II. De plus, des chromosomes étaient parfois positionnés sur les microtubules polaires (Figure 28).

En ce qui concerne les concepts de crossing over, de chromosomes homologues et de tétrade, 7,6%, 16,5% et 28,2%, les ont respectivement compris.

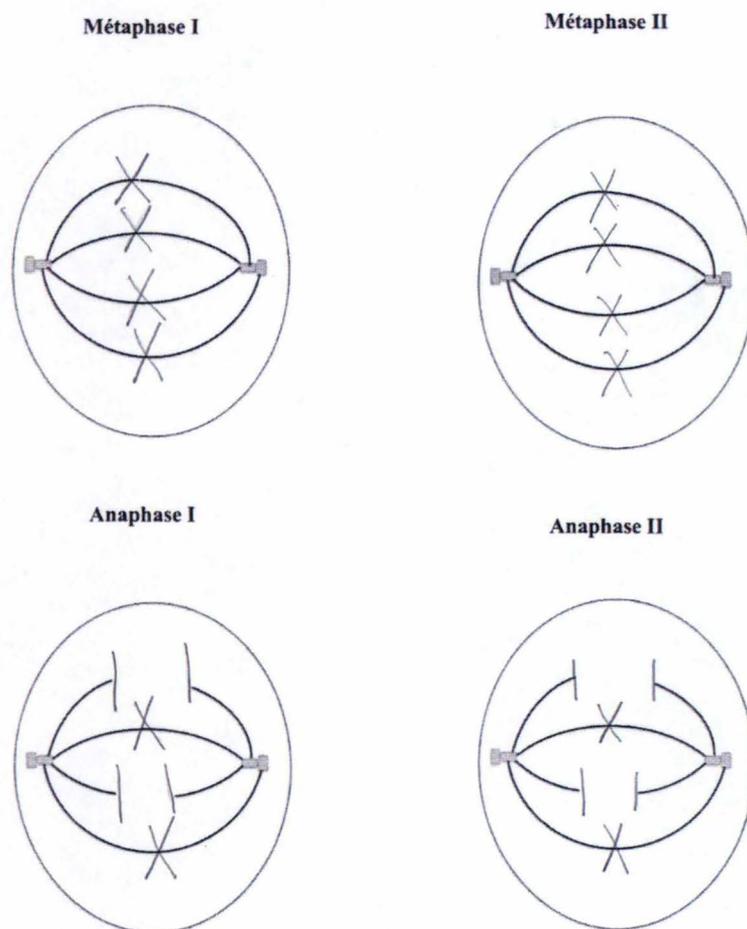


Figure 28: Schéma illustrant une double mitose et l'effet de la présence des microtubules polaires chez les élèves

C. Questions ouvertes

1. La méiose apporte-t-elle des changements génétiques au cours de son processus ?

24% des élèves pensent que la méiose n'implique pas de changements génétiques. 8 % des élèves pensent, quant à eux, que la méiose n'implique pas de changements génétiques à moins d'une mutation. Parmi les 40 % d'élèves répondant positivement à la question, le crossing-over et la réduction du nombre de jeux de chromosomes sont les justifications les plus courantes tandis que le réarrangement aléatoire est une notion très peu émise. (Figure 29).

En outre, moins de 10 % des élèves mentionnent ou dessinent le crossing-over dans les schémas à remplir de la méiose. Par conséquent, pour bon nombre d'élèves, la méiose n'est pas associée à un brassage génétique. Or, à la question concernant les changements génétiques, 20% mentionnent les crossing over.

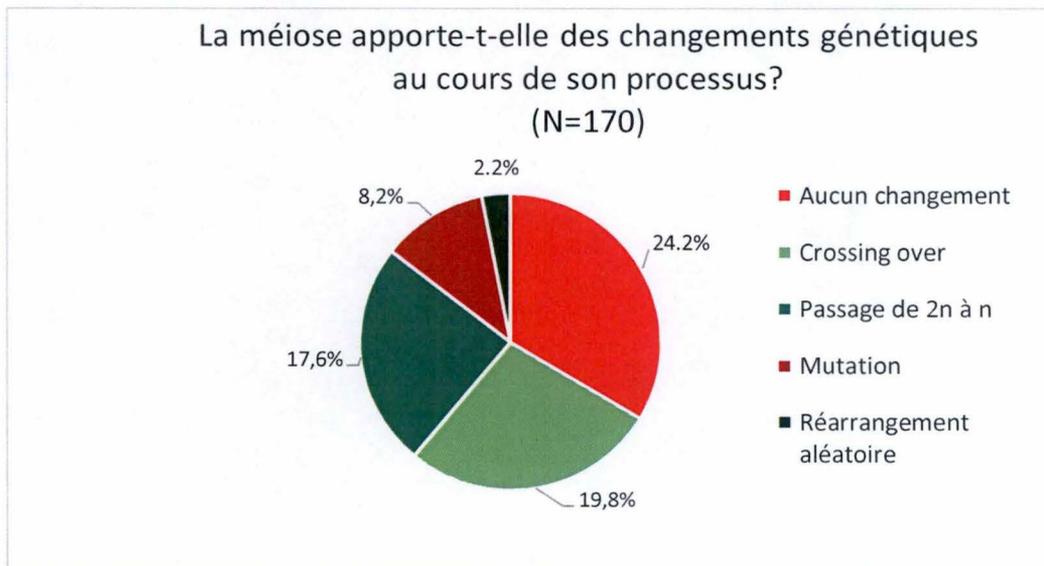


Figure 29: Fréquence relative des réponses à la question "la méiose apporte-t-elle des changements génétiques au cours de son processus?" (N = 170 élèves ; Sans réponse=28%, éludés du graphique)

2. Toutes les cellules d'un homme à l'âge adulte se divisent-elles ? Lesquelles sont en mitose ? Lesquelles sont en méiose ? Donne des exemples

2.1 Toutes les cellules d'un homme à l'âge adulte se divisent-elles ?

Plus de 60% des élèves n'ont pas répondu à cette question et seulement 20% ont donné la bonne réponse (Figure 30). Parmi ces derniers qui étaient au nombre de 32, 15 ont mentionné les neurones et 2 les globules rouges comme exemple de cellules ne se divisant plus.

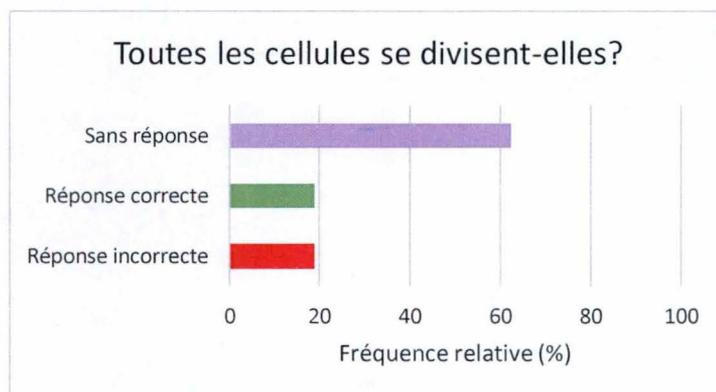


Figure 30: Fréquence relative de réponse correcte, incorrecte ou de sans réponse à la question "toutes les cellules d'un homme à l'âge adulte se divisent-elles ?" (N= 170 élèves)

2.2 Exemples donnés pour les cellules effectuant la mitose ou la méiose

Beaucoup de termes différents ont été utilisés par les élèves pour illustrer les cellules effectuant la mitose ou la méiose. Dans le cadre de la mitose, les moins fréquemment utilisés ont été rassemblés sous le terme « autre ». Dans celui-ci se retrouvent, par exemple, les cellules cardiaques, les ongles, les cheveux, les cellules somatiques ou la régénération (Figure 31). Près de 40% des élèves mentionnent toutes les cellules à l'exception des cellules effectuant la méiose. 8 et 4% des élèves mentionnent de façon erronée, respectivement, les cellules sexuelles et germinales et les globules rouges.

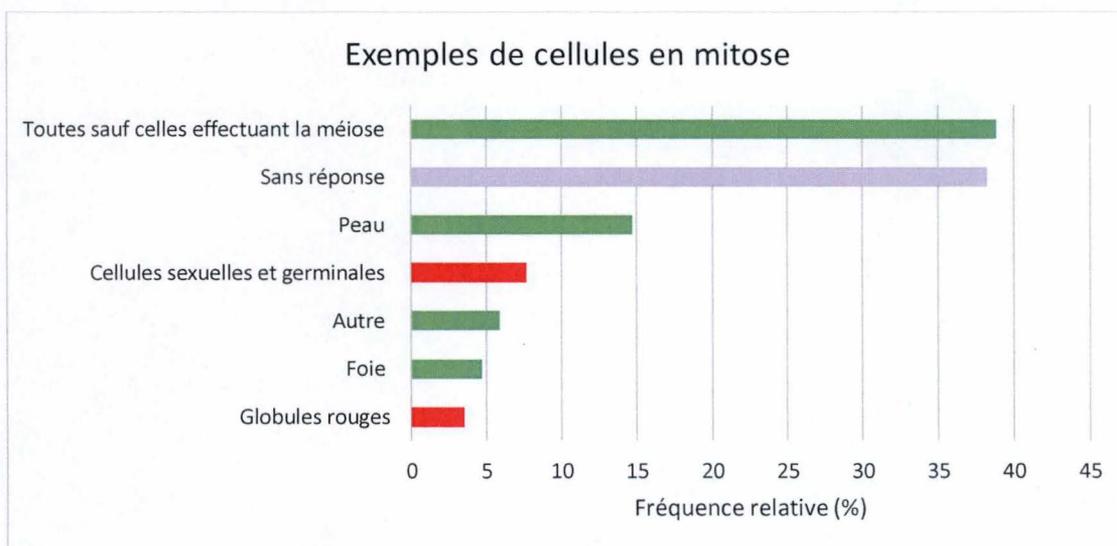


Figure 31: Fréquence relative de chaque exemple en réponse à la question "quelles cellules effectuent la mitose ?" (N = 170 élèves)

Bien qu' environ 35% des élèves ne répondent pas à la question des cellules effectuant la méiose, la majorité des autres mentionne des cellules à caractère reproductif. Seuls 7% répondent de façon erronée (Figure 32).

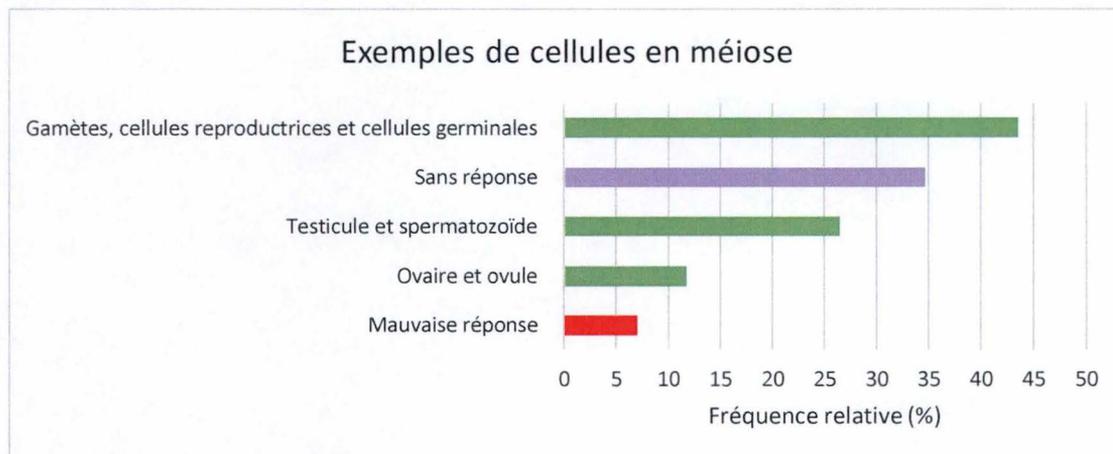


Figure 32: Fréquence relative de chaque exemple en réponse à la question "quelles cellules effectuent la méiose ?" (N = 170 élèves)

3. Les questions liées à la réplication

3.1 À quel moment se produit la réplication/duplication de l'ADN ?

De multiples réponses ont été données par les élèves concernant le moment où se produit la réplication (Figure 33). Parmi celles-ci, la moitié des élèves ne positionne pas correctement la réplication dans le cycle cellulaire contre un tiers qui donne la bonne réponse. Parmi les réponses correctes, certaines étaient générales : « durant l'interphase » ; d'autres étaient plus précises : « durant l'interphase avant la mitose ou la méiose », ou, « durant la phase S ». La fréquence des réponses incorrectes était relativement homogène avec 12% des élèves qui répondent la prophase, 10% la métaphase, 10% l'anaphase et 9% la télophase.

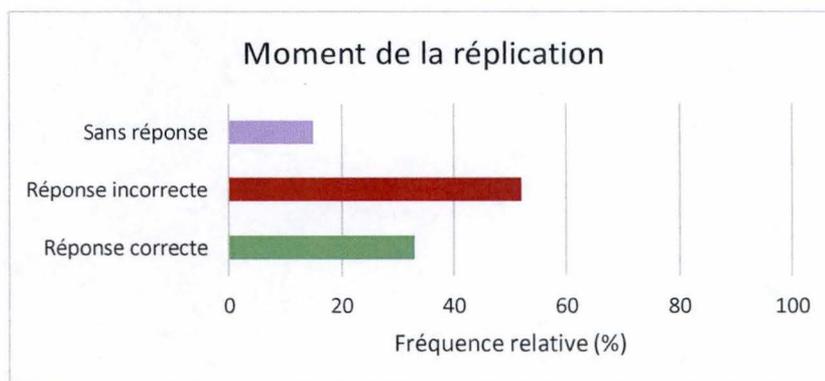


Figure 33: Fréquence relative des réponses à la question « quand a lieu la réplication ? » (N = 170 élèves)

3.2 La réplication/duplication de l'ADN double la quantité d'ADN, le nombre de chromosomes ainsi que les jeux de chromosomes

Cette question a été difficilement perçue par les élèves. Beaucoup semblent, en effet, ne pas avoir compris qu'elle était subdivisée en trois sous questions puisqu'un nombre important de réponses partielles a été donné. Ils éprouvent donc, peut-être, des difficultés à différencier les concepts de quantité d'ADN, de nombre de chromosomes et de jeux de chromosomes. De plus, moins de la moitié d'entre eux sont capables de spécifier que la réplication double la quantité d'ADN. Certains pensent que celle-ci va également doubler le nombre de chromosomes ainsi que le nombre de jeux de chromosomes (Figure 34).

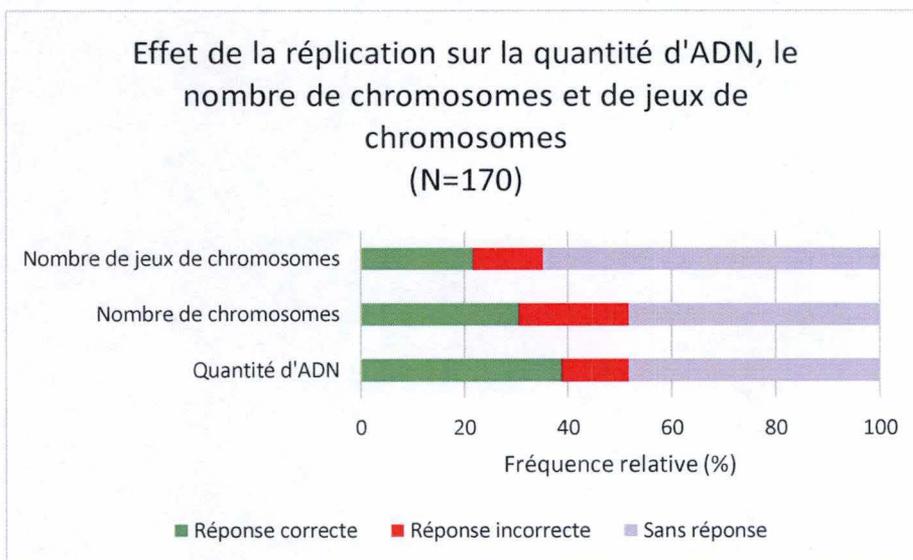


Figure 34: Fréquence relative de chaque réponse pour la question de l'effet de la réplication (bonne réponse = double la quantité d'ADN mais pas le nombre de chromosomes ni le nombre de jeux de chromosomes) (N = 170 élèves)

D. Observation supplémentaire

Certains termes rencontrés étaient spécifiques à une école particulière. Il s'agit des termes « fibres de l'aster » ou « fibres élastiques ».

III. Livres à destination des élèves du secondaire, sciences générales

Après avoir analysé les résultats des questionnaires, des livres à destination des élèves du secondaire ont été étudiés. Ils constituent, en effet, une cause possible des erreurs conceptuelles réalisées par les élèves.

A. 4^{ème} : mitose

Dans tous les livres présentant la mitose, une précision quant à la continuité du processus est apportée. De plus, la prométaphase est omise et l'interphase et la cytokinèse sont toujours clairement séparées de la mitose. Enfin, les cellules décrites sont les cellules animales et végétales.

1. Les éditions de Boeck (Cornet, 2008)

1.1 Description du livre

Dans ce livre, la théorie est en premier lieu abordée au moyen de graphiques, schémas et/ou photos accompagnés de questions qui sont des pistes d'exploitation de ces documents avec les élèves. Un cahier présentant les réponses à ces questions est associé au livre. Suite à cette étape, une synthèse théorique est présentée avant d'étendre les connaissances au moyen de documents supplémentaires, d'expériences et/ou exercices.

1.2 Les aspects qui diffèrent des livres universitaires de référence en Biologie, ou jugés positifs

Premièrement, dans les chapitres précédant celui de la mitose, une différenciation est faite entre un chromosome simple, c'est-à-dire non répliqué et un chromosome double. Néanmoins, aucune explication n'est donnée pour justifier ce passage de simple à double.

Ensuite, différents termes sont utilisés pour une même structure. Ainsi, dans le chapitre de la mitose, le terme chromosome double est remplacé par le terme chromosome dupliqué, qui sera lui-même à nouveau remplacé dans la partie synthèse par le terme chromosome double. En ce qui concerne le centrosome, celui-ci est appelé centriole dans le chapitre sur la mitose. Néanmoins, dans la partie synthèse, c'est le terme centrosome qui est utilisé. Dans la partie synthèse également, une rupture du centromère est mentionnée durant l'anaphase. De plus, ni les centrosomes, ni les microtubules ne sont représentés dans le schéma bilan.

Dans les points positifs, une illustration de la forme de la chromatine, du plus au moins condensé, répliquée ou non en fonction de l'étape du cycle cellulaire est présentée (Figure 35).

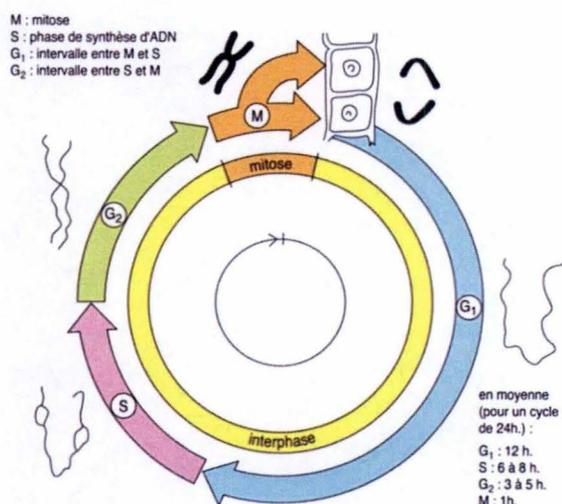


Figure 35: Cycle cellulaire selon le de Boeck collection bio (2008)

Ensuite, la reproduction asexuée est introduite afin d'étendre le processus de mitose à des organismes : organisme unicellulaire ou stolons et rhizomes chez les végétaux, par exemple.

Enfin, les fonctions de la mitose chez l'humain et des applications en médecine sont décrites.

2. Les éditions Van in (Delvigne *et al.*, 2009)

2.1 Description du livre

Ce livre fournit une synthèse théorique de la matière supportée par des schémas et des photos. Un cahier d'activité lui est associé. Celui-ci permet à l'élève de tester ses connaissances. Des expériences peuvent également y être décrites.

2.2 Les aspects qui diffèrent des livres universitaires de référence en Biologie, ou jugés positifs

Tout d'abord, la partie du manuel concernant le cycle cellulaire est difficile à transposer à la théorie décrite dans les livres de référence en Biologie. L'interphase est, en effet, divisée en deux phases, une de croissance et une de croissance et de réplication. Les phases G₁, S et G₂ n'étant pas nommées, il est difficile de dire si les auteurs omettent la description de la G₂ ou s'ils l'englobent dans la phase S.

Ensuite, dans la partie traitant de la mitose, la formation des microtubules est décrite comme se faisant à partir des microtubules des asters. De plus, aucune mention n'est faite des microtubules polaires. Enfin, tout comme dans le de Boeck, un clivage du centromère est décrit.

Néanmoins, les concepts de la diploïdie et de l'haploïdie sont expliqués. De plus, un schéma décrivant le passage de la forme de double hélice de l'ADN à la forme d'un chromosome est ici intégré dans la partie précédant la description de la mitose.

3. Les éditions Plantyn, collection *essentia*, 4^{ème} année (Buschen *et al.*, 2012-2013)

3.1 Description du livre

Cette collection ne comporte qu'un livre de 4^{ème} année, les programmes étant en cours de changement, la partie 5^{ème} année n'a jamais été créée. L'étude théorique est précédée d'une mise en contexte au moyen d'exemples de la vie quotidienne. Des dessins et des photos sont utilisés en support de la théorie. La matière est ensuite résumée dans une partie finale du livre. Un cahier d'activité permettant à l'élève de tester et d'appliquer ses connaissances est également associé à ce livre.

3.2 Les aspects qui diffèrent des livres universitaires de référence en Biologie, ou jugés positifs

D'abord, durant la prophase, la formation d'asters à partir des microtubules des centrosomes est mentionnée mais pas celle du fuseau de division, qui, selon cette édition, se produit en métaphase. Le terme chromatides sœurs est ici remplacé par le terme chromatides jumelles, qui n'a jamais été rencontré dans les livres de référence en Biologie analysés dans le cadre de ce mémoire. En ce qui concerne l'attachement aux microtubules kinétochoriens, il n'est mentionné qu'après l'alignement des chromosomes sur la plaque équatoriale. De plus, la migration des chromatides est encore décrite en télophase. Seules des photos sont présentées dans ce livre, aucun schéma n'a été introduit.

Ensuite, des photos de la mitose d'une cellule végétale sont présentées sans texte associé. Ainsi, la formation de la paroi à partir du centre de la cellule végétale est décrite par deux courtes légendes mentionnant des vésicules contenant de la cellulose au centre de la cellule ainsi qu'une plaque cellulosique.

Néanmoins, des points positifs peuvent être soulignés. La première partie du chapitre mitose énonce les fonctions de la mitose chez l'humain et mentionne également l'exemple de la régénération d'une partie sectionnée chez l'étoile de mer. De plus, un schéma illustre le lien entre l'ADN et le chromosome via la condensation.

B. 5^{ème} : méiose

1. De Boeck collection bio (Cornet, 2009)

Dans l'introduction de la partie traitant de la méiose, cette dernière est définie comme une suite de deux divisions cellulaires. Ensuite, une notion qui n'a pas été rencontrée dans les livres de référence de Biologie est ici présente : le nombre de jeux de chromatides noté « n ». Ainsi, une cellule diploïde dont l'ADN n'est pas répliqué est $2n$ chromatides et une cellule diploïde dont l'ADN s'est dupliqué est $4n$ chromatides. Après la méiose I, la cellule est $2n$ chromatides et n chromatides en fin de méiose II (Figure 36).

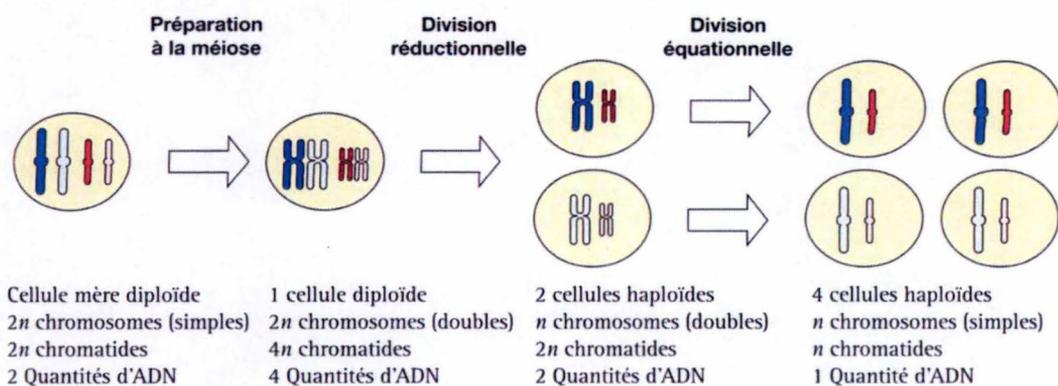


Figure 36: Nombre n de chromatides selon le de Boeck collection bio (2009)

Dans la partie décrivant le processus de méiose, la condensation en chromosomes est décrite comme un raccourcissement des chromosomes homologues. Les schémas omettent les centrosomes et les asters. Les enjambements sont dessinés en prophase I, mais dans les phases suivantes, les couleurs des chromosomes restent intactes, ne montrant donc pas qu'ont eu lieu les crossing over dont on ne fait pas mention dans le texte. Seul le terme tétrade est mentionné dans la description des schémas (Figure 37). Ce n'est que dans la partie suivante que les brassages génétiques sont décrits. Enfin, le fuseau de division est également appelé « fuseau méiotique », terme qui n'a pas été utilisé dans le cadre de ce mémoire.

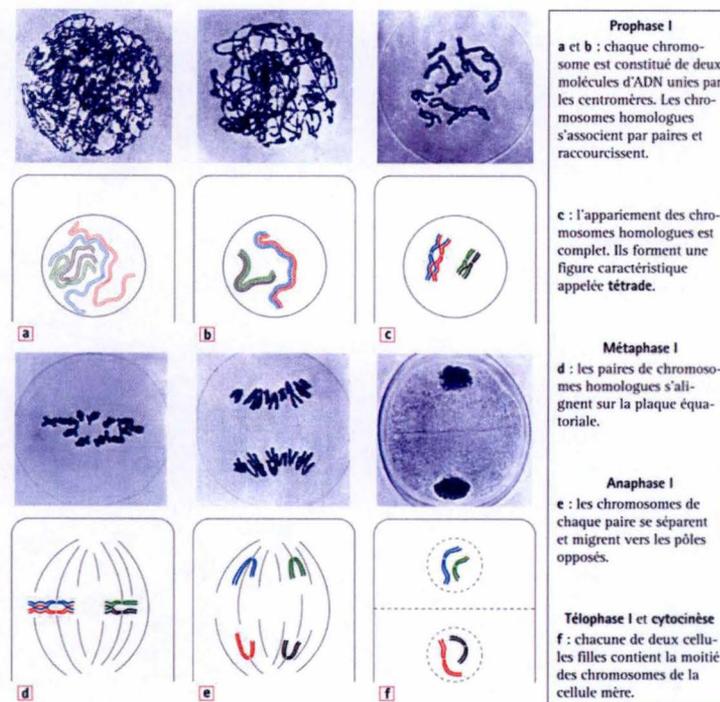


Figure 37: Schéma de la méiose selon le de Boeck collection bio (2009)

En ce qui concerne les points positifs relevés dans ce livre, il y a tout d'abord le rappel en début de chapitre de la notion d'haploïdie et de diploïdie pour différencier les cellules somatiques des gamètes. Cela permet de passer à la partie suivante qui concerne le passage à l'état haploïde grâce à la méiose. Dans la partie synthèse, un paragraphe élargi le champ d'étude et distingue les différents cycles de développement : ceux à majorité haploïde, ceux à majorité diploïde, et les alternances de génération.

2. Van in (Delvigne *et al.*, 2009)

La partie concernant la méiose est assez brève. Celle-ci est également définie comme une double division cellulaire. Aucun enjambement ni crossing over n'est mentionné ou dessiné lors de la prophase I. Les microtubules polaires ne sont pas présentés. Pour décrire le chromosome sous forme de deux chromatides, le terme dichromatidien est utilisé. Il s'agit d'un terme qui n'a jamais été rencontré jusqu'alors. De plus, tout comme dans le chapitre de la mitose du manuel de 4^{ème} année, un clivage du centromère est mentionné. Enfin, dans un schéma présentant la quantité d'ADN en fonction du temps, la réplication est décrite en fin d'interphase, omettant la phase G2.

Le point final concerne le brassage génétique dans lequel l'assortiment aléatoire est mentionné, de même que la fécondation et les crossing over. La description de ces derniers est donc, tout comme dans le de Boeck, séparée de la description du processus de méiose à proprement dit.

Quelques points importants sont synthétisés dans le Tableau 6.

Tableau 6: Tableau comparatif de points importants entre livres (CO= crossing over ; MT= microtubules)

	<i>Le livre fait il mention de ces différents points ?</i>	De Boeck, collection bio	Van in	Plantyn
MITOSE	Mitose = Processus continu	Oui		Non
	Séparation interphase-mitose	Oui		
	Séparation cytokinèse-mitose	Oui		
	G1, S, G2	Oui	Pas nommées mais décrites. Interrogation sur la description de la phase G2	Oui
	Prométaphase	Non		
	Aster	Oui		
	MT polaires	Oui	Non	Oui
MEIOSE	Méiose = « double division »	Oui		Livres non publiés
	Notion d'haploïdie-diploïdie	Oui		
	Dessin des CO	Enjambements dessinés mais pas de changements de couleurs ultérieurs	Non	
	Mention des CO dans la description de la méiose	Non. Description dans un chapitre ultérieur	Non. Description dans un chapitre ultérieur	

IV. Les livres de référence en Biologie

Il est intéressant de noter que des erreurs sont également commises dans les livres de référence en Biologie.

Une erreur concernant le nombre de jeux de chromosomes après la méiose I a ainsi été observée dans le livre d'Alberts *et al.* (2012). Selon eux, les cellules sont, à ce moment, toujours diploïdes.

Raven *et al.* (2014), lorsqu'ils décrivent la polyploïdie, mentionnent un tétraploïde et un hexaploïde à $2n$.

Dans le point de contrôle de la phase G1, Campbell et Reece (2007) et Reece *et al.* (2012) mentionnent une vérification de la bonne réplication de l'ADN. Or, cette réplication ne se fait qu'en phase S, il est donc un peu prématuré de parler de contrôle de la réplication.

Dans la définition de l'endoméiose de Berthet et Amar-Costesec (2006), la première phase de la méiose est nommée mitose réductionnelle. Le terme mitose dans le cadre de la méiose n'est peut-être pas opportun.

Ensuite, des différences de langage concernant la « forme » du chromosome ont été rencontrées dans les livres de référence et sont synthétisées dans le tableau suivant :

Tableau 7: Différents termes utilisés pour la forme du chromosome en fonction du livre de référence

Livre de référence	Terme(s) utilisé(s)				Remarque
	Chromosome d'interphase	Chromatine d'interphase	Chromosome mitotique	Chromosome métaphasique	
Alberts <i>et al.</i> , 2012	✓		✓		Mentionnent différents niveaux de condensation des chromosomes
Campbell et Reece, 2007	✓		✓	✓	
Karp, 2010			✓		
Reece <i>et al.</i> , 2012	✓	✓		✓	

Alberts *et al.* (2012) mentionnent des chromosomes d'interphase et des chromosomes mitotiques ainsi que différents niveaux de condensation des chromosomes. Campbell et Reece (2007) font, eux, mention de chromosomes interphasiques, de chromosomes mitotiques et de chromosomes métaphasiques. Karp (2010) mentionne également des chromosomes mitotiques. Enfin, Reece *et al.* (2012) mentionnent de la chromatine interphasique, des chromosomes interphasiques et des chromosomes métaphasiques.

Le terme « chromosome » est donc déjà utilisé avant la condensation et il est donc parfois fait mention de chromosomes qui se condensent. Cela peut éventuellement prêter à confusion pour l'élève.

Partie 4 : Discussion

I. Résultats des questionnaires

A. Comparaison des erreurs conceptuelles avec la littérature

Un des buts du questionnaire était de comparer les erreurs conceptuelles réalisées par les élèves francophones avec celles rapportées dans la littérature. Le cas de la Belgique semble similaire aux autres pays. Les résultats du questionnaire ne sont globalement pas très bons et les erreurs conceptuelles rencontrées sont également décrites dans la littérature.

La catégorie 4 a, par exemple, été créée suite à l'observation de la tendance de certains élèves à vouloir terminer la mitose sur une forme de chromosome en « X ». Ils vont alors réassembler les chromatides ou les répliquer. D'autres études ont, ainsi, rapporté que les élèves pensent que les chromosomes sont en permanence sous forme répliquée (Atilboz, 2004 ; Dikmenli, 2010 ; Kalas *et al.*, 2013). Ce résultat a fait émerger la question de savoir si les élèves de la catégorie 4.2, qui répliquent les chromatides en fin de mitose, positionnent plus fréquemment la réplication durant la télophase. L'analyse a néanmoins montré que ce n'était le cas que de 12.5 % des élèves de la catégorie 4.2.

Les questions sur la réplication ont d'ailleurs permis de mettre en évidence que peu d'élèves ont compris son principe, comme l'ont montré Kalas *et al.* (2013), de même que le moment auquel elle se produit. Dernier point qui a également été décrit par Dikmenli (2010), Kalas *et al.* (2013) et Lewis *et al.* (2013).

Les élèves interrogés avaient, de plus, des difficultés à faire correspondre le nom de l'étape avec ce qu'il s'y passe, même si dans leur globalité, ils se souviennent des noms. Dikmenli (2010) trouve le même résultat concernant la correspondance. Cela reflète peut-être une étude par pure mémorisation sans comprendre la matière enseignée. Les élèves interrogés par Tekkaya *et al.* (2001) ont d'ailleurs mentionné qu'ils étudiaient par mémorisation.

Ensuite, la difficulté par rapport à la méiose décrite par beaucoup d'auteurs (Chattopadhyay, 2012 ; Dikmenli, 2010 ; Kara et Yeşilyurt, 2008 ; Lewis *et al.*, 2000 ; Newman *et al.*, 2012) est similaire chez les élèves francophones. En effet, moins d'un cinquième des élèves ont correctement répondu aux schémas de méiose à remplir. Cette faible proportion pourrait éventuellement s'expliquer par la présence des microtubules polaires qui semble avoir perturbé certains d'entre eux. De plus, peu ont su mentionner les concepts de tétrade, de crossing over

et de chromosomes homologues. Enfin, un quart des élèves pense qu'il n'y a pas de changements génétiques pendant la méiose.

Néanmoins, contrairement aux résultats obtenus par Chattopadhyay (2012), Kara et Yeşilyurt (2008), et Lewis *et al.* (2000), la localisation des cellules effectuant la mitose ou la méiose chez un Homme adulte ne semble pas problématique chez les élèves francophones.

D'autres erreurs conceptuelles sont décrites dans la littérature mais, pour des raisons de temps, toutes n'ont pas été évaluées dans le cadre de ce questionnaire à destination des élèves du secondaire.

Enfin, il est intéressant de noter que les résultats du questionnaire à destination des premiers baccalauréats en Biologie ne diffèrent pas de ceux à destination des secondaires (Annexe 7). En effet, les noms de phases sont fréquemment cités mais mal utilisés. La méiose a été relevée comme problématique, de même que les concepts de chromosome et de réplication.

B. Hypothèses de causes des erreurs conceptuelles commises

1. Les manuels scolaires

Les livres utilisés par les élèves peuvent être à l'origine de ces erreurs conceptuelles (Deshmukh et Deshmukh, n.d). Le Missouri Department of Elementary and Secondary Education (2005) mentionne ainsi que les diagrammes et images décrits dans les manuels peuvent être erronés ou trompeurs, menant à des erreurs conceptuelles chez les élèves. King (2010), bien que ne s'intéressant qu'aux manuels relatifs aux sciences de la Terre, mentionne, lui, la présence de multiples erreurs conceptuelles, identiques à celles décrites chez les élèves. Quant à Kaltakci et Eryilmaz (2010), qui ce sont eux intéressés au sujet de l'optique en physique, ils ont mentionné comme cause probable des erreurs conceptuelles des élèves, les manuels scolaires. Ces derniers contiendraient des « affirmations fausses, incomplètes ou douteuses ». Il est plus que probable que ce ne soit pas uniquement le cas des manuels traitant des sciences de la Terre ou de l'optique. Le Plantyn (Buschen *et al.*, 2012-2013), analysé dans le cadre de ce mémoire, mentionne ainsi une formation du fuseau en métaphase, une fixation des microtubules aux chromosomes après alignement de ces derniers et une migration des chromatides en télophase. Ce livre est d'ailleurs le seul qui ne figure pas dans les livres agréés sur le site « enseignement.be ». Cependant, les critères d'agrément ne semblent pas réellement analyser

l'exactitude de la théorie décrite dans le livre⁵. Lors de la correction des questionnaires, des erreurs semblables à celles présentes dans le Plantyn ont été observées mais leur fréquence n'a néanmoins pas été mesurée. Enfin, les manuels scolaires ne sont pas les seuls concernés puisque des erreurs ont également pu être observées dans les livres de référence en Biologie étudiés dans ce mémoire.

Néanmoins, les différences théoriques observées dans les manuels scolaires en comparaison avec les livres de référence en Biologie peuvent également résulter d'une transposition didactique externe (Clerc, 2006 ; Dessus et Carpanèse, 2003 ; Paun, 2006 ; Tavignot, 1995), effectuée dans le but de faciliter la compréhension des élèves. Ainsi, par exemple, la régulation du cycle cellulaire n'est, de façon logique, pas enseignée car trop complexe. La prométaphase n'est, quant à elle, pas une phase clé et son absence (Buschen *et al.*, 2012-2013 ; Cornet, 2008 ; Delvigne *et al.*, 2009) n'empêche pas la compréhension du processus général. Cela évite, de surcroît, la mémorisation d'un terme supplémentaire. De plus, la fusion des phases S et G2 (Delvigne *et al.*, 2009) permet certainement aux élèves de mieux retenir que la réplication précède la mitose ou la méiose.

La forme de cette transposition pose cependant parfois question. C'est le cas de l'utilisation du terme « n » pour le nombre de chromatides (Cornet, 2009). Une autre lettre aurait tout à fait pu être utilisée, évitant ainsi une confusion avec le nombre « n » de chromosomes. La description de la méiose comme deux divisions cellulaires successives (Cornet, 2009 ; Delvigne *et al.*, 2009) est, quant à elle, une simplification correcte mais pouvant créer une confusion. En effet, l'élève pourrait potentiellement réduire à « deux mitoses ». Enfin, décrire les crossing over après la méiose (Cornet, 2009 ; Delvigne *et al.*, 2009) est peut-être un choix didactique. Mais, s'ils étaient décrits en même temps que la méiose, il est possible que les élèves omettraient moins fréquemment les crossing over lorsqu'il leur est demandé de décrire la méiose. Cela éviterait également probablement qu'un quart des élèves pense que la méiose n'implique pas de changements génétiques.

Ozgur et Pelitoglu (2008) ont ainsi mis en évidence dans leur étude que les erreurs conceptuelles commises par les élèves sont fonction du manuel suivi, et plus précisément de la transposition didactique effectuée dans celui-ci. En extrapolant leurs résultats, il est possible de se demander si les erreurs conceptuelles commises par les élèves francophones sont différentes en fonction

⁵ Les seuls points théoriques analysés sont la présence des savoirs et compétences à développer par l'élève. Mais, ces savoirs et compétences ne sont pas explicités.

du manuel suivi. L'utilisation de termes spécifiques en fonction de l'école a déjà pu être observée (« fibres de l'aster », par exemple), néanmoins, le suivi éventuel de ces manuels par les élèves ayant répondu aux questionnaires n'a pas été étudiée dans le cadre de ce mémoire. Il s'agirait d'un point intéressant à analyser ultérieurement.

Ces variations en fonction du support utilisé peuvent potentiellement engendrer des inégalités entre élèves. Ceux-ci, quelle que soit l'école dont ils viennent, ont, en effet, la possibilité d'entamer des études en biologie. Ils devraient donc tous être sur un pied d'égalité en ce qui concerne l'apprentissage reçu. Ne serait-il pas plus judicieux, dans ce cas, de réaliser un seul syllabus à destination des élèves de l'enseignement secondaire, que toutes les écoles devront suivre ? La matière à connaître serait ainsi clairement énoncée, cela limiterait la transmission d'erreurs conceptuelles et tous les élèves seraient mis sur un pied d'égalité. Le professeur resterait néanmoins tout à fait libre quant à la façon dont il veut enseigner cette matière, seul le contenu serait clairement défini. La future séquence de cours qui sera réalisée sur la mitose et la méiose pourrait être utilisée dans cette optique. Elle offrirait justement aux professeurs un support dont la matière ne comporte pas d'erreur et qui a été étudié en fonction des erreurs conceptuelles les plus fréquemment commises par les élèves et des causes de celles-ci.

Certes, un référentiel et des programmes existent afin de préciser aux enseignants la matière à apprendre aux élèves. Mais, ceux-ci ne sont pas très détaillés, et, de plus, en fonction de l'appartenance de l'école au réseau libre ou au réseau officiel, ces programmes ne sont pas détaillés de la même manière, renforçant ainsi encore les différences entre élèves (FESeC, 2009 ; FESeC, 2010 ; Ministère de la communauté française, 2001 ; Ministère de la communauté française, 2013 ; Ministère de la communauté française - Service général des affaires pédagogiques, de la recherche en pédagogie et du pilotage de l'enseignement organisé par la communauté française, 2001).

2. Autres causes possibles

Ce mémoire n'a, actuellement, analysé que l'hypothèse des livres scolaires comme cause des erreurs conceptuelles. Mais, d'autres hypothèses quant à la difficulté de compréhension des processus de mitose et de méiose sont envisageables.

2.1 Les professeurs

La transposition didactique interne, effectuée par le professeur, peut également être à l'origine des erreurs conceptuelles commises par les élèves comme l'ont montré Sbaragli et Santi (2011) dans leur étude sur le concept d'angle en mathématique, mais aussi Kaltakci et Eryilmaz (2010) dans leur étude sur les erreurs conceptuelles en optique. D'une part parce que ces professeurs, ne connaissant pas les points critiques de la matière pour les élèves, ne peuvent pas appréhender cette dernière d'une manière qui éviterait l'apparition d'erreurs conceptuelles liées à ces points critiques. D'autre part parce qu'ils peuvent eux-mêmes avoir des notions incorrectes de la matière enseignée (Kaltakci et Eryilmaz, 2010). Deux études ont, ainsi, été effectuées par Monsieur Vervoort sur des étudiants en agrégation de l'enseignement secondaire supérieur en Biologie, dont certains étaient déjà professeurs (Annexe 7). Elles ont révélé que ceux-ci n'avaient pas une parfaite connaissance de la matière.

King (2010) mentionne, de plus, que l'origine des erreurs conceptuelles des professeurs peut être retrouvée dans les manuels.

2.2 Le peu de temps et de matériel

Les élèves interrogés dans les études de Çimer (2012), de Kaya et Gürbüz (2002) et de Tekkaya *et al.* (2001), de même que les professeurs belges de l'étude de Sylla et De Vos (2006) ont mis en avant un manque de matériel dans les écoles secondaires ainsi qu'une grande quantité de matière à enseigner, pour un faible nombre d'heures octroyé⁶. Les enseignants se tournent alors vers des manières d'enseigner classiques et rapides, sans mise en pratique (Çimer, 2012 ; Kaya et Gürbüz, 2002 ; Sylla et De Vos, 2006 ; Tekkaya *et al.*, 2001). Or, des mises en pratique permettraient de mieux comprendre une matière qui est, comme le mentionnent Çimer (2012), Ozcan *et al.* (2012) et le Missouri Department of Elementary and Secondary Education (2005), abstraite pour l'élève. Un article préconise ainsi, comme mise en pratique, un jeu de rôle où les élèves jouent les chromosomes maternels et paternels à l'aide de boudins de piscine à

⁶ À titre d'exemple, le programme de l'enseignement secondaire catholique préconise une durée minimale de 4 périodes pour enseigner la mitose, le caryotype, l'interphase et la réplication (FESeC, 2009).

assembler. Le centromère y est présent, avec une position variable. Les chromosomes homologues différents sont représentés par des tailles différentes de boudins et l'origine paternelle ou maternelle par des différences de couleurs. Les chromosomes d'origine maternelle étant joués par les filles et les paternels par les garçons (Locke et Mcdermid, 2005). Il ne s'agit évidemment pas de l'unique possibilité de mise en pratique ; ce point sera étudié en même temps que la création d'une future séquence de cours.

Le peu de mise en pratique n'est néanmoins pas la seule conséquence au manque de temps pour enseigner la matière. Les élèves ont également moins l'occasion de poser des questions, ce qui limite encore la possibilité de comprendre correctement la matière afin de la retenir à long terme (Çimer, 2012 ; Lujan et DiCarlo, 2006). Cela pourrait expliquer, d'ailleurs, la possibilité évoquée plus haut de la mémorisation par cœur des élèves, sans compréhension (Tekkaya *et al.*, 2001).

Comme dit plus haut, cette problématique n'a pas été analysée dans le cadre de ce mémoire. Il est néanmoins envisageable ultérieurement d'effectuer des interviews d'enseignants et d'élèves dans le secondaire afin de comparer ce qui est décrit dans la littérature avec la situation concrète de ces derniers. Une question personnelle peut également être ajoutée au questionnaire afin d'obtenir l'avis de l'élève sur la difficulté de cette matière.

2.3 Manque de compréhension de concepts de base ou de liens entre différents points

Une autre hypothèse envisageable serait que la non compréhension des processus de mitose et de méiose provient de la non compréhension de concepts de base tels que les gènes et les allèles, par exemple, ou de l'absence de liens faits entre les deux matières. Köse (2008) décrit d'ailleurs la Biologie comme une matière dans laquelle la compréhension d'un nouveau sujet nécessite la compréhension d'un sujet vu au préalable. Deshmukh et Deshmukh (2009) et Newman *et al.* (2012) décrivent, quant à eux, non pas un problème de compréhension de matières vues précédemment, mais simplement un non transfert de la connaissance de ces dernières à la matière en cours d'enseignement. Ce qui peut mener à des erreurs conceptuelles. Dans cette optique, des questions concernant des concepts de base tels que l'information génétique ou les chromosomes, par exemple, devraient être ajoutées au questionnaire.

Il est intéressant de spécifier ici que dans le nouveau référentiel, la mitose, la méiose et la théorie de Mendel sont vues la même année. L'effet de cette réorganisation est difficile à prédire, mais, cela pourrait faciliter l'établissement de liens entre ces matières et diminuer ainsi les difficultés à différencier la mitose et la méiose ou à comprendre l'implication de la méiose dans les lois de Mendel.

L'établissement de liens entre différentes matières peut également être favorisé par l'utilisation, dans le cadre du cours, de cartes conceptuelles. Surapanenin et Tekian (2013) ont ainsi testé et prouvé l'efficacité des cartes conceptuelles dans l'étude de cas cliniques en biochimie. Les étudiants ayant suivi cet enseignement bénéficiaient, par la suite, d'une compréhension plus profonde et d'une capacité à percevoir derrière le cas clinique, les concepts de biochimie qui sont en jeu. Rendas et Pinto (2006) ont, eux, testé et validé l'utilisation de cartes conceptuelles dans un cours de pathophysiologie. Enfin, Asan (2007) a, lui, effectué son étude sur des élèves du secondaire dans le cadre d'une séquence de cours sur la chaleur et la température. Il a obtenu les mêmes résultats quant à l'efficacité des cartes conceptuelles dans l'apprentissage des élèves.

Il est donc envisageable de simplifier quelque peu les cartes conceptuelles réalisées dans le présent mémoire afin de les utiliser lors d'une séquence de cours. Ainsi, les élèves pourraient être amenés à construire cette carte (comme Surapanenin et Tekian, 2013), à la compléter (comme Rendas et Pinto, 2006), ou pourraient simplement la recevoir en support.

2.4 La multitude de termes

La multitude de termes et de définitions utilisés dans le domaine de la biologie est, selon Noyd *et al.* (2014), source de difficultés. Haambokoma (n.d.) mentionne également la multitude de termes, rien que dans le cadre des séquences de cours en génétique. De plus, une même structure peut être nommée de multiples façons comme cela a été observé dans le De Boeck (Cornet, 2008) ou lors de la correction des questionnaires. Ce qui peut être perturbant pour l'élève qui risque alors d'avoir du mal à définir un terme correctement. Des confusions entre termes sont, d'ailleurs, comme vu plus haut, décrites dans la littérature (Dikmenli, 2010 ; Kalas *et al.*, 2013 ; Lewis *et al.*, 2000 ; Tekkaya *et al.*, 2001).

Cela soulève la question de l'importance des termes dans l'étude de la biologie. Le plus important est-il de comprendre le processus ou de mémoriser des termes ?

Dans cette optique, Brown et Ryo ont, en 2008, testé une approche « content first ». Les termes ne sont pas supprimés de la séquence de cours, mais, viennent simplement dans un deuxième

temps. La première partie de l'apprentissage est, en réalité, une explication de la théorie avec des mots quotidiens et non pas des termes scientifiques. Ils ont alors pu observer que les élèves ayant appris de cette manière ont, in fine, une meilleure compréhension du phénomène étudié. Ensuite, selon Noyd *et al.* (2014), il est intéressant de se demander, avant d'utiliser un terme, si celui-ci est pertinent. S'il n'est utilisé qu'une seule fois ou s'il n'aide pas à la compréhension du présent concept ou des suivants, est-il utile de l'employer ?

Les études décrites dans la littérature semblent, quant à elles, se focaliser essentiellement sur la compréhension des concepts par les élèves puisqu'elles portent le plus souvent sur les erreurs *conceptuelles* et non pas sur l'utilisation des termes⁷. La même optique a d'ailleurs été suivie par ce mémoire puisque l'utilisation du terme a, certes, été évaluée mais très peu exploitée dans l'analyse des résultats ; l'accent ayant plutôt été mis sur la compréhension du concept. De même, dans le nouveau questionnaire qui sera décrit plus bas, certains concepts sont évalués sans être nommés. Seule la compréhension est ainsi évaluée. C'est le cas, par exemple, du concept de tétrade. L'étude des termes peut cependant être conservée dans la grille correctrice des questionnaires afin de détecter d'éventuelles différences de termes entre écoles ou l'utilisation de multiples termes pour une même structure dans un même établissement.

C. Le système de catégorisation

Un autre but de ce mémoire était d'évaluer la pertinence d'un système de catégorisation des élèves effectué sur base d'un schéma de mitose à réaliser à partir d'une feuille blanche. L'idée de cette catégorisation provient de l'article de Dikmenli (2010), bien que la catégorisation de ce dernier ne repose pas sur les mêmes critères que ceux du présent mémoire. Il différencie, en effet, les schémas sur base du nombre de concepts présents et de leur bonne ou mauvaise compréhension, sans préciser de concept spécifique à mentionner pour chaque catégorie. La barrière entre certaines catégories reste donc assez floue. La catégorisation utilisée dans le présent mémoire, se base, elle, sur des concepts clairement définis et qui ont été considérés comme les plus importants à savoir l'alignement des chromosomes, leur séparation en chromatides et le maintien de ces dernières sous forme simple.

⁷ Il est ici intéressant de noter que la définition d'un concept contient à la fois sa définition théorique ou compréhension, sa définition opérationnelle ou extension mais aussi le terme utilisé pour le décrire (Dumez, 2011 ; Watt et van den Bergh, 1995). Néanmoins, lorsque la dénomination « erreur conceptuelle » est utilisée, cela fait probablement le plus souvent référence à la compréhension du concept.

La pertinence de celle-ci n'a néanmoins pas pu être entièrement démontrée puisque toutes les catégories ne sont pas significativement différentes les unes des autres en termes de nombre de concepts connus par l'élève. Différentes hypothèses peuvent expliquer ce résultat. Tout d'abord, la catégorisation et l'évaluation du nombre de concepts connus se sont faites sur base de la même question, celle de la mitose. Or, cette question ne précisait pas de détailler au maximum les schémas, certains élèves se sont donc peut être focalisés sur certains points qu'ils jugeaient importants et ont omis certains concepts. Il est également possible que l'élève connaisse le concept mais n'ait pas pensé à le mentionner. Ensuite, certains concepts étudiés n'ont peut-être pas été vus par l'enseignant ou sont trop élémentaires (séparation en deux cellules). Enfin, certains concepts étudiés relevaient de l'interphase alors que la question concernait la mitose.

Cependant, la question que l'on pourrait également se poser est l'utilité de comparer cette catégorisation par rapport à un nombre de concepts connus. Certes, initialement, le but était de n'utiliser, in fine, que cette catégorisation pour évaluer le niveau global de l'élève, avant et après une séquence de cours à tester. Mais, comment améliorer une séquence de cours sans savoir quels sont les points qui posent encore problème ? Ainsi, selon Sundberg (2002), la forme « questionnaire à choix multiples » (QCM) est typique lorsque l'on souhaite effectuer un test avant et après une nouvelle séquence de cours. C'est d'ailleurs la procédure utilisée par Delucchi (2014) ainsi que Kara et Yeşilyurt (2008) dans leur étude sur la division cellulaire et les statistiques sociales, respectivement. D'autres études, comme celles de Chattopadhyay (2012) ou de Kalas *et al.* (2013), par exemple, utilisent, elles, une combinaison de QCM et de questions ouvertes. De plus, cette catégorisation n'évalue que le processus de la mitose. Il ne serait donc pas possible de l'utiliser pour évaluer une séquence de cours sur la méiose.

Elle peut néanmoins être conservée dans la correction du prochain questionnaire. Elle permettra d'obtenir une information rapide sur la compréhension de points jugés importants dans le processus de mitose. Mais, afin d'évaluer les erreurs conceptuelles et ultérieurement la séquence de cours, des questions lui seront toujours annexées. Parmi ces dernières, certaines porteraient sur des concepts connus comme posant problème dans la littérature et qui n'ont pas pu être évalués dans le questionnaire à destination des secondaires. Ce dernier a en effet dû être réduit afin d'avoir une participation plus importante de la part des écoles. Puisque, pour des questions de facilité d'organisation, le questionnaire sera ultérieurement soumis à des étudiants de l'université, le nombre de concepts étudiés pourra être quelque peu augmenté sans risquer une moins bonne participation. Le questionnaire ne devra néanmoins pas durer trop longtemps

afin de rester dans la zone de concentration maximale des élèves. Le temps de concentration moyen d'un élève décrit dans la littérature varie mais est en moyenne de 20 à 30 minutes (Fédération des Associations de Parents de l'Enseignement Officiel, 2008 ; Hourst, 1997).

II. Construction et modifications ultérieures du questionnaire

Suite à la lecture de l'article d'Adams et Wieman (2010), la forme du questionnaire est soumise à questionnement. Cet article semble, en effet, être une référence en la matière puisqu'un nombre important d'auteurs le citent. Dans celui-ci est décrite une construction par étape d'un questionnaire destiné à l'évaluation d'une séquence de cours. Premièrement, il faut déterminer les concepts que les experts considèrent comme importants dans la matière étudiée. Ceux-ci seront alors les seuls étudiés dans le questionnaire. En effet, selon ces auteurs, il est important que le test ne soit pas trop long afin que les élèves y répondent de façon sérieuse. Deuxièmement, ils proposent de détecter les erreurs conceptuelles fréquemment commises et ce, via la littérature, via l'observation de cours de soutien, ainsi que par des interviews d'élèves. L'article mentionne ensuite une étape de construction de questions ouvertes à soumettre à des élèves afin de construire ultérieurement un questionnaire à choix multiples. En effet, les questions ouvertes permettent de détecter des mauvaises réponses qui seront utilisées comme choix incorrects dans le QCM. Avant d'être utilisé, ce dernier devra d'abord être validé par des experts et par des interviews d'élèves. Cela permettra de vérifier que les questions sont compréhensibles et que les experts sont tous d'accord sur ce qu'est la bonne réponse ainsi que sur l'aspect incorrect des réponses alternatives. Typiquement, cet article propose de 20 à 30 questions.

En réalité, la construction du questionnaire de ce mémoire s'est arrêtée à l'étape des questions ouvertes de la procédure d'Adams et Wieman (2010). Les premières étapes de leur article ont en effet été suivies puisque des discussions avec des membres de l'unité ou avec une professeure de biologie du secondaire ont été effectuées. Celles-ci ne se sont pas faites dans l'optique de la construction du questionnaire mais ont influencé la réalisation de celui-ci. De même, l'exploration de la littérature, tout comme ces discussions, ont également permis de détecter certaines erreurs conceptuelles. Les interviews n'ont néanmoins pas été réalisées. Cela n'a pas été considéré comme un manque puisque les erreurs conceptuelles mises en évidence par les autres moyens cités couvraient déjà la majeure partie de la matière de la mitose et de la méiose. Des questions ouvertes ont finalement été construites et analysées, tout comme le préconise leur

article. Pour suivre totalement leur protocole, il est tout à fait envisageable de transformer certaines questions en questions à choix multiples. Le questionnaire pourra ensuite être soumis à des membres de l'Unité Méthodologique de la Didactique et de la Biologie et à des élèves en interviews afin d'être validé.

Certains auteurs critiquent pourtant les QCMs, argumentant qu'ils ne mettent pas en évidence le raisonnement de l'élève et l'origine de l'erreur conceptuelle (Prokop et Faněovičová, 2006). Ce point sur le raisonnement peut être pertinent dans le cas de QCMs qui n'ont pas été construits à l'aide de discussions avec des experts, d'interviews et de réponses données à des questions ouvertes, comme le préconisent Adams et Wieman (2010). Ce qui ne sera pas le cas du prochain questionnaire. Tanner et Allen (2005) spécifient, de plus, que si les réponses alternatives sont bien choisies, le choix de réponse de l'élève reflète en réalité son raisonnement. Ensuite, certaines possibilités concernant l'origine de l'erreur, comme le peu de temps, par exemple, ne peuvent certes pas être évaluées dans le questionnaire. Mais une étude parallèle pourrait s'en charger.

De surcroît, l'option QCM n'est pas la seule possible. D'autres auteurs préconisent par exemple les dessins. C'est le cas de Dikmenli (2010) qui allie dessins et interviews ou de Köse (2008) qui a évalué et montré l'efficacité de l'étude de dessins dans la détection des erreurs conceptuelles. Prokop et Faněovičová (2006) ont, eux, également évalué l'efficacité de l'étude des erreurs conceptuelles par des dessins, mais, sont arrivés à la conclusion opposée. Ils proposent alors d'allier des questions de dessin avec un questionnaire ou des interviews, tout comme Dikmenli (2010).

Enfin, Prokop et Faněovičová (2006) font une remarque intéressante : chaque élève a une préférence dans sa façon d'apprendre et de restituer la matière. Certains auront donc des facilités avec des questions sous forme de dessins, d'autres avec des questions ouvertes et d'autres enfin avec des QCMs. Cependant, cela ne pose pas de problème puisque ce biais sera le même dans tous les groupes. De plus, un compromis va ici être réalisé entre QCM et dessin. Notamment, le schéma de la mitose à réaliser sur base d'une feuille blanche est intéressant et sera conservé puisqu'il permet de déterminer les concepts que l'élève est capable de se rappeler sans aucun indice. Un schéma est également assez explicite quant à la compréhension générale de l'élève. De plus, comme dit plus haut, la catégorisation effectuée sur base de celui-ci donne une idée rapide sur la connaissance de concepts clés de la mitose.

La modification de la forme générale du questionnaire n'est pas la seule qui est à effectuer. Pour les raisons évoquées plus haut, des questions vont être modifiées ou ajoutées. Le nouveau questionnaire comportera donc, en plus du schéma de la mitose, ces questions :

- Tout d'abord concernant l'effet de la réplication (questions basées sur l'article de Kalas *et al.*, 2013):
« Coche la ou les bonne(s) réponse(s) ou « Je ne sais pas » : Quel effet la réplication/duplication a-t-elle sur la quantité d'ADN ?
 - Elle la double,
 - Elle la divise par deux
 - Elle l'augmente
 - Elle la diminue
 - La réplication n'a pas d'effet sur la quantité d'ADN
 - Je ne sais pas »

Deux questions identiques à celle-ci concernant le nombre de chromosomes et de jeux de chromosomes seront également présentes. Cela permettra d'évaluer la compréhension de l'effet de la réplication. L'option « je ne sais pas » permet de diminuer les réponses données à l'aveugle qui sont parfois plus fréquentes dans un questionnaire à choix multiples.

- Concernant le moment de la réplication (basée sur l'article de Dikmenli (2010)) :
« Coche la ou les bonne(s) réponse(s) ou « Je ne sais pas » : À quel moment se produit la réplication/duplication de l'ADN ?
 - Télaphase
 - Prophase
 - Interphase
 - Anaphase
 - Métaphase
 - Je ne sais pas »
- Pour les cellules qui effectuent des divisions chez l'Homme adulte :
 - « Coche la ou les bonne(s) réponse(s) ou « Je ne sais pas » : Les cellules se divisent-elles encore à l'âge adulte ?
 - Non, la croissance est finie, plus aucune cellule ne se divise

- Oui, toutes les cellules conservent leur capacité à se diviser

- Cela dépend du type de cellule

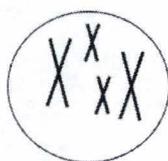
- Je ne sais pas »

➤ « Coche les cellules effectuant la mitose et/ou la méiose ou « Je ne sais pas » »
(basée sur l'article de Lewis (2010)) :

	<i>MITOSE</i>	<i>MEIOSE</i>	<i>Je ne sais pas</i>
<i>Cellules de la peau</i>			
<i>Cellules des testicules</i>			
<i>Cellules des ovaires</i>			
<i>Cellules des reins</i>			
<i>Cellules intestinales</i>			
<i>Cellules végétales</i>			
<i>Je ne sais pas</i>			

- En ce qui concerne le schéma de la cellule en méiose à compléter, il est possible que les élèves aient été perturbés par la présence de microtubules polaires. La résolution de ce problème est délicate puisque dans le cas où les microtubules polaires seraient supprimés, la réponse deviendrait plus intuitive pour les élèves. D'autres questions évaluant le processus de méiose ont donc dû être créées :

➤ « Soit une cellule diploïde qui entre en méiose :

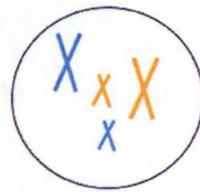


Cellule diploïde qui va subir une méiose

Dessine la position de ces chromosomes lors de la métaphase I, de l'anaphase I, de la métaphase II et de l'anaphase II »

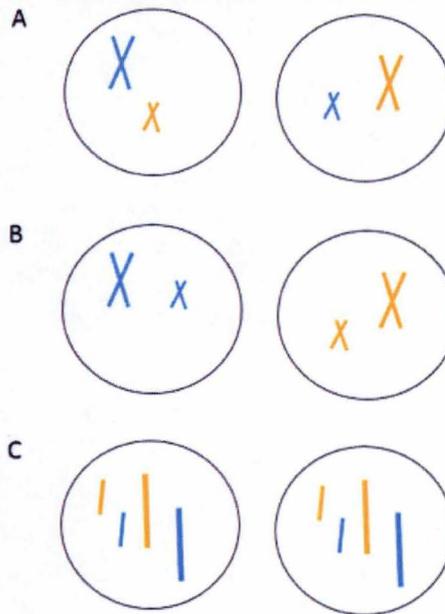
Dans cette question, les concepts de tétrade et de chromosomes homologues sont étudiés. Les dessins réalisés permettront, en effet, de voir si l'élève assemble les chromosomes en tétrade au moment de la métaphase I et si ces chromosomes sont des homologues. De plus, des schémas identiques en méiose I et II peuvent être détectés. Néanmoins, le concept de réarrangement aléatoire n'est pas évalué, contrairement à cette deuxième possibilité de question :

➤ « Coche la ou les bonne(s) réponse(s) ou « Je ne sais pas » :



Cellule diploïde qui va subir une méiose

Après la méiose I, les deux cellules obtenues sont:



D Je ne sais pas

Cette deuxième question permet tout d'abord d'évaluer le concept de tétrade puisque si l'élève sépare des chromatides (réponse C), il n'a pas compris que les chromosomes homologues s'apparient et s'alignent ensemble. Les couleurs permettent, quant à elles, de déterminer s'il a acquis le concept de réarrangement aléatoire. Ce qui sera le cas s'il coche à la fois la réponse A et la réponse B.

- Concernant les crossing over (basée sur l'article de Lewis (2010)) :

« Coche la ou les bonne(s) réponse(s) ou « Je ne sais pas » :

- À la fin de la mitose, l'ADN contenu dans chaque cellule fille est identique à l'ADN de la cellule mère
- À la fin de la mitose, l'ADN contenu dans chaque cellule fille est différent de l'ADN de la cellule mère

- *À la fin de la méiose, l'ADN contenu dans chaque cellule fille est identique à l'ADN de la cellule mère*
- *À la fin de la méiose, l'ADN contenu dans chaque cellule fille est différent de l'ADN de la cellule mère*
- *Je ne sais pas »*

Cette question permet d'évaluer si l'élève a compris que des changements génétiques s'opèrent durant la méiose mais aussi d'évaluer ce point dans le cas de la mitose.

- En ce qui concerne la réduction du nombre de chromosomes en fin de méiose (basée sur l'article de Lewis (2010)) :

« Coche la ou les bonne(s) réponse(s) ou « Je ne sais pas » : Soit une cellule contenant 4 chromosomes, combien de chromosomes contiendra chaque cellule fille à la fin de la méiose :

- *4*
- *8*
- *2*
- *16*
- *1*
- *Je ne sais pas »*

- Concernant la ploïdie (basée sur l'article de Kalas *et al.*, 2013)

« Coche la ou les bonne(s) réponse(s) ou « Je ne sais pas » : Une caractéristique qui permet de distinguer une cellule diploïde d'une cellule haploïde est :

- *Qu'une cellule haploïde contient deux fois moins de chromosomes qu'une cellule diploïde*
- *Qu'une cellule haploïde contient une seule copie ou jeu de chromosomes alors qu'une cellule diploïde en a deux*
- *Que les chromosomes d'une cellule haploïde sont sous forme simple, c'est-à-dire non répliquée, alors que les chromosomes d'une cellule diploïde sont sous forme double, c'est-à-dire répliquée*
- *Je ne sais pas »*

Grâce à cette question, il est possible de déterminer si l'élève pense que le passage à l'haploïdie résulte d'une simple division par deux du nombre de chromosomes ou que la ploïdie est fonction de l'état répliqué ou non du chromosome.

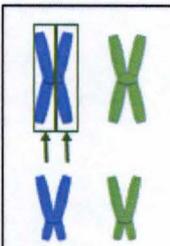
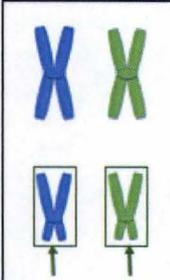
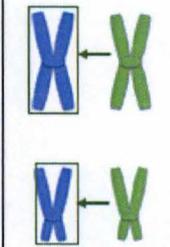
- Afin d'évaluer le lien entre le concept d'information génétique et les concepts de chromosomes, chromosomes homologues et chromatides :

➤ « Coche la ou les structure(s) qui porte(nt) l'information génétique ou « Je ne sais pas » (basée sur les articles de Ozcan (2012) et Lewis et Wood-Robinson (2000)) :

- Gène
- ADN
- Chromosome
- Je ne sais pas »

Cette question permet d'évaluer si l'élève fait le lien entre ces différents concepts.

➤ « L'information génétique est-elle la même entre les deux flèches ? Coche « Oui », « Non » ou « Je ne sais pas ». Ensuite, nomme ce que les cadres verts désignent à chaque ligne :

	Oui	Non	Je ne sais pas
			
			
			

Dans cette question est évaluée la compréhension des concepts de chromatides sœurs qui sont issues de la réplication et sont donc génétiquement identiques. Cette question permet également d'évaluer le concept de chromosomes homologues qui contiennent les mêmes gènes mais des allèles différents et enfin, le concept de chromosome, l'information génétique n'étant pas la même entre chromosomes différents.

Cette question donne néanmoins un indice pour la question précédente. Elle devra donc être soumise séparément. Il est envisageable de rassembler les questions sous forme schématique dans une dernière partie de questionnaire.

- *« Réponds à la question suivante par « Vrai », « Faux » ou « Je ne sais pas » (basée sur l'article de Lewis et Wood-Robinson (2000)) :*

Les gènes du foie ne sont présents que dans les cellules du foie »

Cette dernière question permet de déterminer si l'élève a conscience que toutes les cellules contiennent l'entièreté de l'information génétique mais n'en expriment pas l'entièreté.

Comme dit plus haut, avant de soumettre le questionnaire à une classe entière, il serait intéressant de réaliser, comme le préconisent Adams et Wieman (2010), des interviews d'experts mais aussi d'élèves. Durant ces dernières, l'élève sera invité à penser tout haut, ce qui permettra d'évaluer la bonne compréhension de la question de même que le raisonnement de l'élève. Ce dernier point pourrait éventuellement aider dans la construction de la future séquence de cours.

III. Déroulement de l'évaluation

La durée totale du questionnaire sera de 30 minutes. Tout d'abord, comme pour le premier questionnaire, 10 minutes sont accordées aux élèves pour réaliser un dessin de la mitose. Ce temps avait, en effet, été suffisant pour tous les élèves interrogés. Le temps alloué au QCM a, quant à lui, été calculé sur base de l'article d'Adams et Wieman (2010) qui mentionnent une durée maximale de 30 minutes pour 20 à 30 questions à choix multiples, soit 1 minute à 1 minute et demi par question. Le questionnaire comportant 13 questions et en comptant large, les élèves disposeront donc de 20 minutes pour répondre au QCM. Celles-ci seront divisées en deux afin de séparer les questions de type schéma des autres questions.

Concernant la motivation des élèves à répondre au questionnaire, Shi *et al.* (2010) ont remarqué de meilleurs résultats lorsque ce dernier fait partie de l'examen final en comparaison avec des questionnaires donnés en ligne et qui fournissent des points de participation. Néanmoins, peu d'études ont mentionné l'utilisation d'un questionnaire côté. De surcroît, cela risquerait, selon Adams et Wieman (2010), de stimuler des échanges de questions entre élèves d'année en année. Une amélioration serait donc détectée, mais celle-ci ne serait pas due à une meilleure séquence de cours mais simplement à une connaissance préalable des questions. Le questionnaire devant être soumis plusieurs années de suite, cette option ne sera pas suivie dans le cadre de ce mémoire. L'important est de toujours standardiser la méthode d'évaluation afin de pouvoir comparer efficacement les résultats, comme le spécifient Shi et al (2010). Les élèves peuvent néanmoins être sensibilisés à la problématique avant la soumission du questionnaire dans le but de les motiver à y répondre (Adams et Wieman, 2010 ; Shi et al, 2010).

Enfin, ce questionnaire devra toujours être donné exactement au même moment de l'année afin de pouvoir comparer les résultats sur plusieurs années. En effet, Ding *et al.* (2008) ont montré une incidence du moment de soumission du test sur les résultats des élèves.

Conclusion

Le questionnaire soumis aux élèves de l'enseignement secondaire général, option sciences générales a permis de mettre en évidence et de comparer les erreurs commises par ces derniers avec celles d'élèves d'autres pays. Les résultats se sont montrés similaires avec des difficultés quant à la forme du chromosome en « X » de départ qu'ils veulent retrouver en fin de mitose. De même, le concept de la réplication est également problématique pour les élèves, qu'il s'agisse de son positionnement dans le cycle cellulaire ou de son principe. Enfin, peu d'élèves associent la méiose avec des changements génétiques.

La question a ensuite été de savoir quelles pouvaient être les causes de ces erreurs conceptuelles. Parmi celles-ci, les manuels scolaires qui peuvent contenir des erreurs. De surcroît, la transposition didactique réalisée dans ces manuels peut parfois prêter à confusion et potentiellement induire des erreurs dans l'esprit des élèves. C'est le cas de l'utilisation de la lettre « n » pour le nombre de chromatides. La transposition menant à la réalisation de référentiels et de programmes laisse, quant à elle, de par le faible contenu de ces derniers, une grande liberté quant à la matière enseignée.

Les manuels scolaires ne sont pourtant pas la seule cause possible des erreurs conceptuelles. L'exploration de la littérature a ainsi révélé que la transposition didactique interne opérée par le professeur peut également être source d'erreur. Le manque de temps alloué à cet enseignement et le peu de mises en pratique qui en découle sont également mis en cause. Les élèves peuvent, de plus, avoir du mal à comprendre des concepts de base ou à faire des liens entre ceux-ci et la matière en cours d'étude. Enfin, une dernière cause possible est la multitude de termes utilisés dans le cadre du cours de Biologie.

Ces différentes causes n'ont, en réalité, été évaluées que de façon théorique dans le présent mémoire. Elles restent donc à vérifier.

Enfin, le système de catégorisation testé n'a pas pu être entièrement démontré comme pertinent. De plus, sa seule utilisation n'aurait pas permis de mettre en évidence un large éventail d'erreurs conceptuelles. Néanmoins, il fournit une information rapide quant à la connaissance de points clés de la mitose, il sera donc conservé mais un questionnaire lui sera annexé.

Perspectives

Le nouveau questionnaire réalisé dans le cadre de ce mémoire n'a pas encore été évalué. Des experts pourraient l'étudier afin de déterminer si les questions et réponses proposées sont pertinentes. De même, pour suivre l'article d'Adams et Wieman (2010), des interviews d'élèves pourraient être réalisées afin de s'assurer de la bonne compréhension de la question et d'évaluer le raisonnement de ces derniers. Une fois le questionnaire validé, il pourra être soumis à des élèves afin d'étudier un nombre plus important de concepts que le précédent questionnaire. Des erreurs conceptuelles supplémentaires pourraient donc être détectées.

De plus, parmi les causes pouvant amener les élèves à commettre des erreurs, seuls les manuels scolaires ont été étudiés de façon pratique dans ce mémoire. Par la suite, il serait intéressant d'envisager une analyse des causes décrites dans la littérature telles que le peu de temps ou de matériel pour donner cours.

Lorsqu'un large éventail d'erreurs aura été évalué et l'origine de celles-ci étudiée, de nouvelles transpositions didactiques pourront être élaborées, plus ou moins détaillées, plus fondamentales ou plus techniques, d'après le public cible. En effet, seul le cas des élèves de l'enseignement secondaire général, option sciences générales a, actuellement, été envisagé. Le questionnaire pourrait également être adapté et soumis à des élèves d'autres orientations afin de créer des séquences de cours qui leurs seraient propres. Celles-ci pourront mettre l'accent sur les concepts détectés comme plus difficiles et adopteront une démarche permettant aux élèves d'avoir une compréhension plus profonde des concepts qui entrent en jeu dans les processus de mitose et de méiose. Certains aspects ayant déjà été discutés comme la mise en place de travaux pratiques tels que des jeux de rôle, par exemple, ou l'utilisation d'une démarche « content first ». D'autres méthodes décrites dans la littérature devront être étudiées afin de parvenir à une séquence de cours la plus optimale possible pour les élèves. Cette séquence de cours pourra, de surcroît, être testée au moyen du questionnaire utilisé pour détecter les erreurs conceptuelles.

Annexes

Annexe 1 : Complément d'information sur la théorie

Annexe 2 : Les pourcentages d'élèves réalisant les erreurs conceptuelles

Annexe 3 : Questionnaire à destination des élèves de 6^{ème} année de l'enseignement secondaire général, sciences générales

Annexe 4 : Grille de correction des questionnaires des élèves du secondaire

Annexe 5 : Schémas correctifs pour la mitose

Annexe 6 : Les cartes conceptuelles

Annexe 7 : Questionnaire à destination des premiers baccalauréats en Biologie, résultats des premiers baccalauréats en Biologie et des étudiants en agrégation – TFB Audrey Gilson

Bibliographie

Livres :

Alberts : Alberts, Bray, Hopkin, Johnson, Lewis, Raff, Roberts, Walter. (2012). L'essentiel de la biologie cellulaire. 3^{ème} édition. Lavoisier

Berthet, J. et Amar-Costesec A. (2006). Dictionnaire de biologie. De Boeck

Campbell, N., Reece J. (2004). Biologie. 2^{ème} édition, Editions De Boeck

Campbell, N., Reece, J. (2007). Biologie. 7^{ème} édition. Pearson Education

Chevallard Y. (1985). *La transposition didactique du savoir savant au savoir enseigné*. Grenoble, France : La Pensée Sauvage (Recherches en Didactique des Mathématiques) 126 p.

Griffiths, Gelbart, Miller, Lewontin. (2001). Analyse génétique moderne. 1^{ère} édition. De Boeck

Karp : Karp. (2010). Biologie Cellulaire et Moléculaire. 3^{ème} édition. Editions de Boeck

Noyd R. K., Krueger J. A., Hill K. M. (2014). Biology - organisms and adaptations. Brooks/Cole Cengage learning.

Raven : Raven, Jonson, Mason, Losos, Singer. (2014). Biologie. 3^{ème} édition. Editions de Boeck

Reece, Urry, Cain, Wasserman, Minorsky, Jackson. (2012). Biologie. 9^{ème} édition. Pearson Education

Verret M. (1975). Le temps des études. Paris: Librairie Champollion, 2 tomes.

Watt, J. H., van den Bergh S. A. (1995). Research Methods for Communication Science. Allyn and Bacon

Les référentiels et programmes

Référentiels :

Ministère de la communauté française. (2001). Compétences terminales et savoirs requis en sciences générales - humanités générales et technologiques

Ministère de la communauté française. (2013). Compétences terminales et savoirs requis en sciences générales - humanités générales et technologiques

Programmes du réseau libre :

FESeC. (2009). Programme du deuxième degré des sciences générales – Humanités générales et technologiques. Enseignement catholique secondaire.

FESeC. (2010). Programme du troisième degré des sciences générales – Humanités générales et technologiques. Enseignement catholique secondaire.

Programmes du réseau officiel :

Ministère de la communauté française - Service général des affaires pédagogiques, de la recherche en pédagogie et du pilotage de l'enseignement organisé par la communauté française. (2001). Enseignement secondaire ordinaire de plein exercice – humanités générales et technologiques – enseignement secondaire général et technique de transition – troisième degré – programme d'études du cours de biologie.

Les livres à destination des élèves du secondaire

Cornet, M. (2008). Biologie 4 - Sciences de 1er et 2e niveaux. Collection BIO. De Boeck

Cornet, M. (2009). Biologie 5- Sciences générales. Collection BIO. De Boeck

Delvigne, M., Faway, M., Marchesini, R. C., Simon, X., Verhaeghe, P., Walravens, E. (2009). BIO 4 Référenciel. Van in

Delvigne, M., Faway, M., Marchesini, R. C., Simon, X., Verhaeghe, P., Walravens, E. (2009). BIO 5 Référenciel. Van in

Buschen, J., Deckers, G., Degosserie, N., Hanique, S., Sprumont, M., van Sull, P., (2012-2013). ESSENTIA 4 référentiel réseau libre. Plantyn

Articles

Adams, W. K., & Wieman, C. E. (2010). Development and Validation of Instruments to Measure Learning of Expert-Like Thinking. *Assessment*, 0693, 1–24.

Asan, A. (2007). Concept mapping in science class: A case study of fifth grade students. *Educational Technology and Society*, 10(1), 186–195.

Atilboz, N. G. (2004). Lise 1. Sınıf öğrencilerinin mitoz ve mayoz bölünme konuları ile ilgili anlama düzeyleri ve kavram yanlışları. *G. Ü. Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi* [Online serial], 24(3), 147-157

Barral, Y. (2003). Le fuseau mitotique est-il un organe sensoriel de la cellule ?. *Med Sci (Paris)*, 19(11), 1054–1056.

Brown B. A., & Ryoo K. (2008). Teaching science as a language: A “content-first” approach to science teaching. *Journal of Research in Science Teaching*, 45(5), 529-553.

Chattopadhyay, A. (2012). Understanding of Mitosis and Meiosis in Higher Secondary Students of Northeast India and the Implications for Genetics Education. *Cell Biology Education*, 2(3), 41-47.

Çimer, A. (2012). What makes biology learning difficult and effective: Students’ views. *Educational Research*, 7(3), 61-71.

Clerc, J. B., Minder, P., Roduit, G. (2006). La transposition didactique. Haute Ecole Pédagogique Vaud (HEPVD).

Delucchi, M. (2014). Measuring Student Learning in Social Statistics: A Pretest-Posttest Study of Knowledge Gain. *Teaching Sociology*, 42(3), 231–239.

Deshmukh, N. D., Deshmukh, V. M. (n.d). Textbook: a source of students’ misconceptions at the secondary school level.

- Deshmukh, N. D., & Deshmukh, V. M. (2009). A study of students' misconceptions in biology at the secondary school level. *Proceedings of 6th International Conference on Hands on Science*.
- Dessus, P., & Carpanèse, J.-Y. (2003). Référence au savoir et aux connaissances dans une séquence d'enseignement en éducation civique. *Revue Des Sciences de L'éducation*, 29(3), 609.
- Dikmenli, M. (2010). Misconceptions of cell division held by student teachers in biology: A drawing analysis, 5(2), 235-247.
- Ding, L., Reay, N. W., Lee, A., & Bao, L. (2008). Effects of testing conditions on conceptual survey results. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 4(1), 2-7.
- Dubois, A. (2008). Drôles d'espèces. Hybridation, perturbations de la méiose et spéciation dans le règne animal : quelques points délicats de terminologie, d'éidonomie et de nomenclature, 169-202.
- Dumez, H. (2011). Qu'est-ce qu'un concept ?. AEGIS Le Libellio, 66-79.
- Fédération des Associations de Parents de l'Enseignement Officiel. (2008). Le sens du rythme- Rythmes scolaires, biologiques et psychologique de l'enfant et de l'adolescent.
- Haambokoma, C. (n.d.). Nature and Causes of Learning Difficulties in Genetics at High School Level in Zambia, 13(1), 1-9.
- Hourst, B. (1997). Au bon plaisir d'apprendre. éd. Interéditions. Paris
- Kalas, P., Neill, A. O., & Pollock, C., Gülnur, B. (2013). Development of a Meiosis Concept Inventory. *Education*, 12, 655-664.
- Kaltakci, D., & Eryilmaz, A. (2010). Sources of optics misconceptions. In G. Çakmakçı & M. F. Taşar (Eds.), *Contemporary Science Education Research: Learning and Assessment* (pp.13-16). Ankara, Turkey: Pegem Akademi.

- Kara, Y., Yeşilyurt, S. (2008). Comparing the Impacts of Tutorial and Edutainment Software Programs on Students' Achievements, Misconceptions, and Attitudes towards Biology. *Journal of Science Education and Technology*, 17:32-41.
- Kaya, E., Gürbüz, H. (2002). The views of the high schools and vocational high schools students on the problems of biology teaching. *Erzincan Univ. J. Educ.*, 4(2) : 11-21.
- Khladi, 2010/2011, M. (2010/2011). Transposition didactique. Ecole Normale Supérieure (ENS) de Tétouan. Master Education en Mathématiques et Technologie (EMT).
- King, C. J. H. (2010). An Analysis of Misconceptions in Science Textbooks: Earth science in England and Wales. *International Journal of Science Education*, 32(5), 565–601.
- Köse, S. (2008). Diagnosing student misconceptions: Using drawings as a research method. *World Applied Sciences Journal*, 3(2), 283–293.
- Lewis, J., Leach, J., Wood-Robinson, C. (2000). Chromosomes: the missing link- young people's understanding of mitosis, meiosis, and fertilisation. *Journal of Biological Education*, 34.
- Lewis, J., Wood-Robinson, C. (2000). Genes, chromosomes, cell division and inheritance – do students see any relationship? *International Journal of Science education*, Vol. 22, N° 2, 177-195.
- Locke, J., & Mcdermid, H. E. (2005). Innovations in Teaching and Learning Genetics Using Pool Noodles to Teach Mitosis and Meiosis. *America*, 6(May), 5–6.
- Lujan, H. L., & DiCarlo, S. E. (2006). Too much teaching, not enough learning: what is the solution? *Advances in Physiology Education*, 30(1), 17–22.
- Missouri Department of Elementary and Secondary Education. (2005). Misconceptions in science - Alerts to Student Difficulties and Misconceptions in Science. Basé et adapté à partir de : Stepan, J. (1994). *Targeting Students' Science Misconceptions*. FL: Idea Factory.
- Newman, D. L., Catavero, C. M., & Wright, L. K. (2012). Students Fail to Transfer Knowledge of Chromosome Structure to Topics Pertaining to Cell Division. *Education*, 11, 425-436.

- Ozcan, T., Yildirim, O., & Ozgur, S. (2012). Determining of the university freshmen student's misconceptions and alternative conceptions about Mitosis and Meiosis. *Sciences-New York*, 46, 3677-3680.
- Ozgur, S., & Cildir Pelitoglu, F. (2008). The investigation of 6th grade student misconceptions originated from didactic about the "digestive system" subject. *Kuram ve Uygulamada Egitim Bilimleri*, 8(1), 149-159.
- Palmer, TD., Takahashi, J., Gage, FH. (1997). The Adult Rat Hippocampus Contains Primordial Neural Stem Cells. *Molecular and cellular neuroscience*, 8(6), 389-404.
- Paun E. (2006). Transposition didactique : un processus de construction du savoir scolaire. *Carrefours de l'éducation*, 2006/2 (n°22), 3-13.
- Pawlikowska, P., Fouchet, P., Vainchenker, W., Rosselli, F., & Naim, V. (2014). Defective endomitosis during megakaryopoiesis leads to thrombocytopenia in *Fanca^{-/-}* mice. *Blood*, 124(24), 3613-3623.
- Perrenoud, P. (1998). La transposition didactique à partir de pratiques : des savoirs aux compétences. *Revue Des Sciences de L'éducation*, 24(3), 487.
- Prokop, P., & Faněovičová, J. (2006). Students' ideas about the human body: Do they really draw what they know? *Journal of Baltic Science*, 2(10), 86-95.
- Ravel, L. (2003). Des programmes à la classe : Etude de la transposition didactique interne. Exemple de l'arithmétique en Terminale S spécialité mathématique. Education. Université Joseph-Fourier - Grenoble I.
- Rendas, A. B., Fonseca, M., & Pinto, P. R. (2006). Toward meaningful learning in undergraduate medical education using concept maps in a PBL pathophysiology course. *Advances in Physiology Education*, 30(1), 23-29.
- Sbaragli, S., Santi, G. (2011). Teacher's Choices As the Cause of Misconceptions in the Learning of the Concept of Angle. *Education*, 4(2), 117-157.

- Shi, J., Wood, W. B., Martin, J. M., Guild, N. A., Vicens, Q., Knight J. K. (2010). A Diagnostic Assessment for Introductory Molecular and Cell Biology. *CBE—Life Sciences Education*, 9, 453–461
- Strgar, J., & Faculty, B. (2013). Development of the concept of cell division through biology education. *Acta Biologica Slovenica*, 56, 65-74.
- Sundberg, M. D. (2002). Assessing student learning. *Cell Biology Education*, 1(1), 11–15.
- Surapaneni, K. M., & Tekian, A. (2013). Concept mapping enhances learning of biochemistry. *Medical Education Online*, 18, 1–4.
- Sylla, N., & De Vos, L. (2006). Facteurs déterminant l'application de nouvelles tâches d'enseignement dans le secondaire supérieur. *Revue Des Sciences de L'éducation*, 32(2),
- Tanner, K., & Allen, D. (2005). Approaches to biology teaching and learning: understanding the wrong answers--teaching toward conceptual change. *Cell Biology Education*, 4(2), 112–117.
- Tavignot, P. (1995). À Propos De La Transposition Didactique En Didactique Des Mathématiques. *SPIRALE - Revue de Recherches En Éducation*, 15, 31–60.
- Tekkaya, C., Özcan, Ö., Sungur, S. (2001). Biology Concepts Perceived As Difficult By Turkish High School Students Zor Olarak Algıladıkları. *Middle East*, 145–150.
- Williams, M., Debarger, A. H., Montgomery, B. L., Zhou, X., & Tate, E. (2011). Exploring Middle School Students' Conceptions of the Relationship Between Genetic Inheritance and Cell Division. *Science*.