

Difficultés de compréhension de la dynamique des chromosomes chez les apprenants du cycle qualifiant et réflexion sur des solutions pédagogiques

[Difficulties in understanding chromosome dynamics among qualifying-cycle learners and reflection on pedagogical solutions]

Hicham Boumajane and Wissal Iraqi-Houssaini

Département de Biologie, Centre Régional des Métiers de l'Éducation et de la Formation, Fès-Meknès, Morocco

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The concept of genetic information has long been integrated into Life and Earth Sciences curricula in Morocco. However, the teaching materials commonly used in classrooms remain insufficient to effectively communicate the dynamic nature of chromosomes during the cell cycle. Chromosomal behavior in mitosis and meiosis is consistently identified as one of the most challenging topics for high school students in biology. This research focused on identifying the key factors that hinder students' understanding of chromosome dynamics at the secondary level. It also aimed to evaluate the relevance and effectiveness of the didactic tools used in classrooms to represent these biological processes. The present study was conducted using an observation grid applied to two science classes. The findings reveal persistent misconceptions among students. The research advocates for pedagogical strategies that incorporate dynamic models, guided reasoning, and conceptual scaffolding to promote a deeper and more accurate understanding of chromosomal dynamics.

KEYWORDS: Crossing-over, Mitosis, Meiosis, Chromosome modeling.

RESUME: La notion d'information génétique est intégrée depuis des décennies dans les programmes des SVT. Toutefois, les supports pédagogiques traditionnellement utilisés se révèlent souvent insuffisants pour transmettre la nature dynamique des chromosomes au cours du cycle cellulaire. De même, le comportement chromosomique durant la mitose et la méiose demeure l'un des concepts les plus complexes à assimiler pour les apprenants. La présente recherche s'est centrée sur l'identification des facteurs rendant difficile l'apprentissage de la dynamique chromosomique, tout en analysant l'efficacité des supports pédagogiques utilisés. À l'aide d'une grille d'observation appliquée dans deux classes de sciences mathématiques, l'étude a révélé des représentations erronées persistantes chez les apprenants. Les résultats obtenus plaident en faveur d'une révision des pratiques pédagogiques actuelles, en intégrant des méthodes actives, des outils interactifs et une modélisation progressive des phénomènes, afin de renforcer la compréhension du caractère dynamique et logique des mouvements chromosomiques et de promouvoir une éducation scientifique centrée sur la construction de sens plutôt que sur la mémorisation mécanique.

MOTS-CLEFS: Crossing-over, Mitose, Meiose, Modélisation des chromosomes.

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE GÉNÉRAL

Le XXI^e siècle s'impose comme celui de la génomique [1], marqué par des avancées majeures allant de la découverte de la structure de la molécule d'ADN, à l'introduction de la technologie de l'ADN recombinant, pour aboutir à l'achèvement du Projet Génome Humain (HGP) en 2003 [2]. Aujourd'hui, ces avancées se prolongent à travers divers projets nationaux, notamment

les travaux en cours sur le Projet Génome Marocain (MGP) [3], illustrant l'intérêt croissant porté à l'information génétique dans les sociétés modernes. Conscients de cette évolution, les systèmes éducatifs à travers le monde ont intégré la notion de l'information génétique comme un élément fondamental de programmes scolaires [4]. Le concept de la génétique est intimement lié à la maîtrise des notions fondamentales telles que la cellule et les mécanismes de division cellulaire [5]. Des enseignants à différents niveaux rapportent que les apprenants rencontrent des difficultés à comprendre le processus de la division cellulaire [6]. Intégré aux programmes de Sciences de la Vie et de la Terre (SVT) du cycle qualifiant (CQ), ce processus s'inscrit dans la notion de l'information génétique et constitue une introduction aux notions de reproduction (sexuée et asexuée) ainsi qu'aux fondements de la génétique.

La division cellulaire est un processus continu¹, mais elle est découpée en une série d'étapes permettant de distinguer les caractéristiques marquantes à des moments précis [7]. La dynamique et l'orientation des chromosomes au cours de la mitose et la méiose (M&M) sont essentielles à la compréhension du concept par les apprenants en SVT [8]. Bien que ces notions soient intégrées aux programmes de SVT depuis plusieurs décennies, de nombreuses études révèlent la persistance d'idées erronées et de difficultés conceptuelles chez les apprenants [4,9,10]. Parmi toutes les étapes de la méiose, le processus de crossing-over et la recombinaison méiotique, essentiels à une ségrégation correcte des chromosomes et à la diversité génétique [11], demeurent parmi les plus mystérieux pour les étudiants [12]. Ces processus biologiques ne sont pas directement observables [13], ce qui conduit à un recours fréquent à des schémas complexes dans les supports pédagogiques afin d'aider les apprenants à visualiser la dynamique chromosomique associée à ces phénomènes [12]. Contrairement aux enseignants, qui possèdent les compétences nécessaires pour interpréter et concevoir les représentations graphiques et des schémas utilisés pour communiquer cette dynamique, les apprenants éprouvent souvent des difficultés à comprendre pleinement ces illustrations statiques [14]. Par conséquent, les phénomènes liés à la dynamique des chromosomes restent souvent opaques pour les apprenants en SVT, ce qui conduit à l'élaboration de modèles mentaux erronés et à l'ancrage de conceptions fausses particulièrement résistantes au changement [15].

1.2 PROBLÉMATIQUE

Ce projet s'inscrit dans le cadre de mon stage en tant qu'enseignant stagiaire du CQ en SVT dans un établissement public à Meknès (Maroc). Dans ce cadre, J'ai observé que la compréhension de la dynamique des chromosomes, notamment lors de la M&M, du crossing-over, ainsi que des variations du nombre chromosomique au cours du cycle cellulaire (CC), représente un défi majeur pour les apprenants. Bien que ces notions soient incluses dans le curriculum depuis plusieurs décennies, leur communication pédagogique reste insuffisante. L'utilisation d'outils tels que les schémas ou les manuels scolaires ne permet pas toujours aux apprenants de saisir de manière adéquate le concept de la dynamique chromosomique. Cette limitation pédagogique contribue à l'émergence et à la persistance de conceptions erronées, souvent ancrées durablement dans leur raisonnement. Dès lors, se posent les questions suivantes: Quels sont les facteurs qui rendent l'apprentissage de concepts en relation avec la dynamique des chromosomes difficiles pour les apprenants ? et quelles alternatives pédagogiques pourraient être mises en place pour améliorer la transmission des connaissances sur la dynamique des chromosomes ?

1.3 OBJECTIFS

Notre recherche s'est focalisée sur trois objectifs qui sont:

- Identifier les facteurs qui rendent l'apprentissage des concepts liés à la dynamique des chromosomes particulièrement difficile pour les apprenants du CQ.
- Recenser la diversité des méthodes pédagogiques utilisées pour l'enseignement de la dynamique des chromosomes.
- Analyser l'efficacité des outils/supports utilisés pour communiquer la dynamique des chromosomes.

1.4 HYPOTHÈSES

Dans ce travail, nous avons émis quatre hypothèses à confirmer ou à rejeter pour essayer de répondre à la problématique que nous avons émise plus haut.

¹ Il existe des exceptions, notamment chez les cellules en phase G0, les ovocytes et les cellules sénescents.

- Le manque de modèles interactifs et de maquettes accessibles pour visualiser la dynamique des chromosomes au cours du CC favorise l'élaboration de représentations mentales erronées chez les apprenants.
- La non-diversification des méthodes d'enseignement limite la capacité des apprenants à comparer leurs modèles mentaux à d'autres représentations plus scientifiques.
- Les schémas généralement utilisés pour enseigner la dynamique chromosomique offrent des représentations discontinues des mouvements chromosomiques et peu réalistes.
- Les modalités de communication et d'introduction de la dynamique chromosomique sont principalement orientées vers la mémorisation des positions des chromosomes en vue des examens.

2 MATÉRIELS & MÉTHODES

Dans le cadre de cette recherche visant à identifier les facteurs qui rendent l'apprentissage des concepts liés à la dynamique des chromosomes particulièrement difficile pour les apprenants du CQ, à recenser la diversité des méthodes pédagogiques utilisées pour l'enseignement de la dynamique des chromosomes, et analyser l'efficacité des outils/soutiens utilisés pour communiquer la dynamique des chromosomes, une grille d'observation a été élaborée et mobilisée comme outil principal de collecte de données. Elle a été appliquée sur un échantillon constitué de deux classes de première année baccalauréat, filière Sciences Mathématiques CQ, au sein d'un établissement public à Meknès (Maroc). L'effectif total des deux classes s'élève à 73 élèves.

Cette grille visait à évaluer de manière structurée plusieurs dimensions liées à l'enseignement et à la compréhension de la dynamique des chromosomes au cours de CC, notamment à travers l'identification des obstacles pédagogiques, des pratiques d'enseignement et des soutiens utilisés. Les observations ont permis de recueillir des données concrètes sur les méthodes didactiques employées, leur diversité et la nature des soutiens utilisés pour enseigner la dynamique des chromosomes.

La grille est présentée avec ses différents composants dans la partie « Résultats ».

3 RÉSULTATS

La division cellulaire est un processus comportant toute une série d'étapes permettant de distinguer les caractéristiques marquantes à des moments précis. La dynamique et l'orientation des chromosomes au cours de la mitose et la méiose sont essentielles à la compréhension du concept par les apprenants en SVT. Notre travail de recherche à objectif principal d'identifier les facteurs qui rendent l'apprentissage des concepts liés à la dynamique des chromosomes particulièrement difficile pour les apprenants du CQ, a utilisé une grille d'observation avec plusieurs critères et indicateurs. L'observation menée dans deux classes, a permis de recueillir des données empiriques réparties selon quatre critères principaux: (1) les difficultés de compréhension des apprenants, (2) la diversité des méthodes pédagogiques utilisées, (3) l'adéquation des schémas, et (4) l'orientation vers la mémorisation.

Tableau 1. Grille d'observation des difficultés de compréhension et des pratiques pédagogiques en SVT

Critères	Indicateurs	Oui	Non
1. Difficultés de compréhension des apprenants	Confusions dans les réponses aux questions orales sur les étapes de la M&M.	✓	
	Mauvaise chronologie des phases du CC.	✓	
	Reconnaissance d'une phase du CC à partir de la disposition des chromosomes observée dans un schéma ou une illustration.		✓
	Interversion fréquente des phases de la M&M.	✓	
	Confusion entre chromatide et chromosome, avec utilisation de mots comme 'truc qui bouge' au lieu de centromère, chromatide, etc.	✓	
2. Diversité des méthodes pédagogiques utilisées	La variété des approches pédagogiques (<i>maquettes, simulations, vidéos, jeux, etc.</i>) stimule l'engagement des apprenants et facilite leur compréhension de la dynamique chromosomique au cours des phases de la M&M.	✓	
	L'utilisation exclusive de schémas statiques limite la capacité des apprenants à percevoir la continuité et la logique des mouvements chromosomiques durant les différentes phases de la M&M.	✓	

	L'intégration de méthodes actives (<i>travail de groupe, débats, mises en situation etc.</i>) permet aux apprenants d'expliquer par eux-mêmes les étapes du CC.	✓	
3. Adéquation des schémas	Présence de flèches dans les schémas reliant les différentes phases aide les apprenants à visualiser la progression temporelle et le déplacement dynamique des chromosomes durant le CC.		✓
	Les schémas qui représentent de manière explicite le phénomène de crossing-over au cours de la prophase I ainsi que les mouvements chromosomiques associés, aident les apprenants à localiser cet événement clé et à comprendre son rôle dans la recombinaison génétique.	✓	
	L'utilisation de schémas évolutifs montrant les changements morphologiques successifs d'un même chromosome au fil des étapes de la M&M aide les apprenants à visualiser la continuité du CC et à construire une compréhension dynamique du processus.	✓	
4. Orientation vers la mémorisation.	Le manque d'explication sur la logique biologique du mouvement chromosomiques oriente les apprenants vers une mémorisation séquentielle/mécanique des étapes et du positionnement des chromosomes au lieu d'une compréhension approfondie du cycle.	✓	
	Les questionnements en classe sollicitent les compétences de raisonnement et d'explication des apprenants, les amenant à établir des liens entre les étapes de la M&M et leurs fonctions biologiques, favorisant ainsi une compréhension approfondie plutôt qu'une simple mémorisation.	✓	
	La présentation directe de schémas complets illustrant toutes les étapes de la M&M sans progression questionnement intermédiaire, pousse les apprenants à mémoriser les positions des chromosomes plutôt qu'à réfléchir sur la logique du déroulement des phases et à construire une compréhension progressive du processus.	✓	

L'analyse des résultats issus de l'observation, met en lumière plusieurs constats significatifs en lien avec la problématique de l'étude:

3.1 DIFFICULTÉS DE COMPRÉHENSION

Les observations révèlent des lacunes notables dans la compréhension des concepts liés à la M&M. Ces difficultés se traduisent par une interversion fréquente des phases du CC, une mauvaise chronologie des événements, ainsi qu'une confusion persistante entre chromatides et chromosomes. Cette confusion lexicale et conceptuelle illustrée par l'emploi de termes vagues comme '*truc qui bouge*', témoigne de représentations mentales floues et d'une absence de maîtrise du vocabulaire scientifique de base. Par ailleurs, les apprenants éprouvent des difficultés à identifier les phases cellulaires à partir de la disposition des chromosomes dans des schémas non légendés, ce qui montre une faible capacité à faire le lien entre les représentations visuelles et la réalité dynamique du CC.

Ces éléments suggèrent un traitement fragmenté du savoir, centré davantage sur l'identification statique des phases que sur leur enchaînement logique ou leur rôle fonctionnel. Le manque d'appropriation du caractère dynamique et continu du CC semble constituer un obstacle majeur à une compréhension conceptuelle solide.

3.2 DIVERSITÉ DES MÉTHODES PÉDAGOGIQUES

L'analyse des pratiques pédagogiques met en évidence une variation significative dans la manière dont la dynamique chromosomique est simulée auprès des apprenants, selon les méthodes utilisées. D'un côté, certaines situations d'enseignement se distinguent par la mobilisation de supports variés, favorisant l'engagement cognitif d'un large éventail d'apprenants et facilitant l'accessibilité à des concepts abstraits. En particulier, l'utilisation de modèles ou de maquettes, à des moments précis du déroulement du cours, permet aux apprenants de confronter leurs modèles mentaux à ceux présentés par

l'enseignant. Le recours à des méthodes actives, telles que le travail en groupe, les questionnements ouverts ou les mises en situation, a offert aux élèves l'opportunité de verbaliser eux-mêmes les étapes du CC contribuant ainsi à une construction progressive et plus solide du savoir.

À l'inverse, d'autres contextes reposant principalement sur la présentation de schémas statiques, sans accompagnement explicatif ou dynamique, tendent à figer les représentations mentales des apprenants. Cette approche limite leur capacité à percevoir les transformations successives des chromosomes comme un processus évolutif, et favorise l'élaboration de conceptions discontinues du CC. Le déficit dans l'utilisation de maquettes, de modèles dynamiques ou de méthodes actives compromet ainsi la construction d'une compréhension approfondie du CC. En l'absence de supports visuels ou manipulables permettant de représenter concrètement la dynamique chromosomique, les élèves développent des conceptions figées, fragmentées, voire erronées du processus biologique étudié.

Il ressort de ces observations que la diversité méthodologique joue un rôle central dans la qualité de la représentation que les apprenants se font de la dynamique chromosomique. L'absence de variété dans les approches pédagogiques semble fortement corrélée à des incompréhensions persistantes.

3.3 ADÉQUATION DES SCHÉMAS

L'analyse des schémas utilisés en classe souligne une insuffisance dans la représentation dynamique du CC. L'utilisation des flèches entre les différentes phases du cycle ne suffit pas à communiquer la nature dynamique des chromosomes, ce qui limite l'illustration de la progression temporelle et les mouvements continus des chromosomes. Cette faiblesse graphique empêche les apprenants de percevoir le CC comme un processus évolutif fluide, et renforce l'idée d'une succession d'étapes figées, sans transition ni transformation réelle des structures chromosomiques. Cependant, le recours à des schémas évolutifs, où un même chromosome est représenté en transition sur plusieurs phases, permettant de mieux illustrer les changements morphologiques progressifs. Ce type de représentation, bien qu'isolé (traitant l'évolution d'un chromosome individuel), s'est révélé pertinent pour renforcer la cohérence du processus et la logique des événements. Ainsi, la qualité des supports visuels tant dans leur construction que dans leur exploitation pédagogique constitue un facteur déterminant dans la mise en évidence du caractère dynamique du CC.

3.4 ORIENTATION VERS LA MÉMORISATION

L'analyse indique que certaines pratiques pédagogiques tendent à favoriser la mémorisation mécanique des phases plutôt que la compréhension de leur enchaînement logique. L'absence de questionnements orientés vers le sens biologique des étapes, ou la présentation directe de schémas complets sans cheminement progressif, encouragent chez les élèves une approche algorithmique, focalisée sur le repérage visuel des formes plutôt que sur l'analyse fonctionnelle et l'appropriation de la logique biologique en question. Inversement, la pratique du questionnement guidé, lorsque les enseignants amènent les apprenants à réfléchir sur les objectifs de chaque phase et à faire le lien entre la structure observée et sa fonction. Ces pratiques contribuent à réorienter l'apprentissage vers une compréhension intégrée plutôt qu'une accumulation de données isolées.

L'orientation vers la mémorisation semble donc dépendre du positionnement didactique de l'enseignant: lorsque l'explication se construit avec ces apprenants à travers des interactions, la compréhension semble progresser, lorsque l'enseignant se limite à transmettre des représentations toutes faites, la mémorisation prend le dessus.

3.5 OBSERVATION HORS GRILLE

Les apprenants ont également manifesté des confusions quant à la dynamique des chromosomes, notamment en lien avec d'autres événements cytoplasmiques essentiels survenant au cours du CC tels que les variations du volume cellulaire, le comportement des centromères, ou encore l'organisation des microtubules. L'usage d'un vocabulaire scientifique trop large ou imprécis pour décrire la dynamique des chromosomes peut accroître le risque d'émergence de conceptions erronées chez les apprenants. À l'inverse, l'emploi de termes précis et essentiels favorise une meilleure compréhension et aide les élèves à se concentrer sur les éléments fondamentaux à retenir. L'utilisation de maquettes, de modèles ou de vidéos pour illustrer la dynamique des chromosomes s'avère plus efficace lorsqu'elle intervient après l'explication complète du cours. Ces supports offrent aux apprenants des repères visuels leur permettant de confronter et d'affiner leurs raisonnements mentaux à travers une comparaison avec les représentations didactiques proposées. L'encouragement des apprenants à analyser et critiquer le degré de pertinence des schémas, modèles ou supports utilisés favorise la clarification collective des conceptions erronées. Le recours exclusif à des schémas statiques pour représenter le CC induit chez les apprenants une conception discontinue du processus, leur donnant l'impression que la cellule passe brusquement d'une phase à l'autre et que les chromosomes restent

immobiles, sans dynamique réelle. L'introduction du crossing-over avant l'étude du CC, ainsi que l'appropriation par les apprenants de la nature dynamique des chromosomes, résultent d'autres conceptions erronées concernant le crossing-over.

4 DISCUSSION

Les apprenants du CQ en SVT ont manifesté des difficultés notables à assimiler la nature dynamique des chromosomes. Ces difficultés, ainsi que d'autres liées aux processus fondamentaux de la division cellulaire (*notamment la confusion entre les phases du CC, la mauvaise compréhension des comportements chromosomiques durant la M&M, ou encore la méconnaissance du phénomène de crossing-over*) sont régulièrement signalées par les enseignants depuis plus de vingt ans [16–21].

Ces malentendus traduisent souvent une représentation linéaire, figée ou fragmentaire du CC, dans laquelle les chromosomes sont perçus comme des structures statiques, plutôt que comme des entités dynamiques engagées dans un processus continu. En plus de la dynamique des chromosomes, la majorité des concepts abordés dans le cadre de la notion de l'information génétique semble de présenter un caractère abstrait [22,25], ce qui en complique considérablement l'assimilation par les apprenants, comme le souligne également d'autres études [26]. Notre étude révèle que l'usage exclusif de schémas statiques pour enseigner la dynamique des chromosomes favorise l'élaboration de modèles mentaux erronés, et persistantes contre la remédiation, comme rapporté par des auteurs [26,27]. Ces représentations inexactes se construisent en l'absence de supports didactiques interactifs permettant aux apprenants de confronter, questionner et ajuster leurs propres conceptions.

Étant donné que le CQ constitue le premier contact (académique) des apprenants avec la notion de dynamique chromosomique, l'émergence de conceptions erronées à ce stade est tout à fait plausible. Plusieurs études suggèrent que si les expériences d'apprentissage des apprenants sont habilement guidées dès cette étape, les erreurs conceptuelles pouvant résulter d'une assimilation non régulée peuvent être évitées ou corrigées [27]. Dans ce contexte, le style d'enseignement adopté par l'enseignant représente un facteur déterminant dans le développement d'une compréhension correcte chez les apprenants à ce niveau [22]. En effet, le déficit en maquettes, modèles dynamiques ou méthodes pédagogiques actives (ainsi que l'absence d'approches combinant ces éléments) constitue un frein majeur à la compréhension de la dynamique des chromosomes et du caractère évolutif du CC. Ce déficit limite la capacité des apprenants à visualiser les transformations successives des chromosomes et à construire une représentation intégrée et évolutive du processus. Dans ce contexte, l'apparition de diverses conceptions erronées devient tout à fait compréhensible, comme cela a été rapporté [29,30].

Notre étude révèle également que l'enseignement de la dynamique des chromosomes reste largement centré sur la mémorisation séquentielle des étapes plutôt que sur l'analyse des processus sous-jacents. Les apprenants sont exposés de manière répétitive aux mêmes supports didactiques, sans être véritablement amenés à réfléchir sur la logique biologique qui gouverne les comportements chromosomiques. Cet enjeu a été soulevé par plusieurs auteurs [12].

5 CONCLUSION

Cette recherche-action a permis de mettre en évidence les difficultés majeures rencontrées par les apprenants du CQ en SVT dans la compréhension de la dynamique des chromosomes (un concept fondamental en SV, mais de nature abstraite). Les observations menées en classe ont révélé une tendance marquée chez les apprenants à percevoir le CC de manière fragmentée, linéaire ou statique, sans appréhender la continuité et l'évolution des phénomènes chromosomiques. Ces difficultés s'expliquent en grande partie par des pratiques pédagogiques encore centrées sur la mémorisation des étapes/phases et l'utilisation exclusive de schémas figés, au détriment de méthodes actives et de supports dynamiques tels que les maquettes, les simulations ou les modélisations interactives. Le manque de ressources didactiques adaptées limite la capacité des apprenants à visualiser et à intégrer les transformations successives des chromosomes dans une logique spatio-temporelle cohérente.

Par ailleurs, la dynamique chromosomique mobilise simultanément des concepts structurels, spatiaux et temporels complexes, ce qui accentue son caractère abstrait. Dès lors, le rôle de l'enseignant s'avère crucial (son style d'enseignement, les supports qu'il mobilise et la manière dont il oriente la réflexion des apprenants influencent directement la qualité des représentations construites).

Les résultats de cette étude plaident pour une transformation des pratiques pédagogiques en faveur d'approches interactives, contextualisées et axées sur la construction du sens et logique. L'introduction de modèles dynamiques, d'activités de manipulation et de questionnements guidés permettrait non seulement de prévenir les conceptions erronées, mais aussi de renforcer une compréhension profonde et durable des processus cellulaires.

Enfin, cette recherche ouvre des perspectives prometteuses pour repenser l'enseignement des notions abstraites dans les programmes de SVT. La promotion d'une pédagogie fondée sur la compréhension active plutôt que sur la simple reproduction de contenus constitue un levier essentiel pour l'amélioration de la qualité de l'enseignement scientifique au CQ.

RECOMMANDATIONS

- Présenter la division cellulaire comme un processus continu, en insistant sur la fluidité des événements plutôt que sur leur découpage en étapes fixes.
- Éviter l'usage exclusif de schémas statiques, qui fige les représentations mentales et freine la compréhension du caractère évolutif du CC.
- Utiliser des maquettes et modèles interactifs et dynamiques pour rendre la dynamique chromosomique plus concrète et observable.
- Éviter d'introduire immédiatement les modèles ou maquettes, Il est préférable de ne pas commencer l'enseignement par ces supports, mais de les mobiliser à des moments stratégiques du cours, afin de fournir aux apprenants un point de référence pour comparer, confronter et ajuster leurs propres modèles mentaux.
- Diversifier les modalités d'apprentissage (visuelle, tactile, écrite) pour répondre à la diversité des profils d'apprenants.
- Favoriser des moments de réflexion critique sur les outils didactiques utilisés, en invitant les apprenants à analyser leur efficacité pour communiquer les phénomènes en question.
- Relier les transformations morphologiques, quantitatives et spatio-temporelles des chromosomes à leur logique biologique, pour favoriser un raisonnement scientifique cohérent tout en évitant la mémorisation mécanique des phénomènes en question.
- Introduire l'évolution d'un seul chromosome à travers tout le CC, afin de faciliter la construction d'une vision intégrée.
- Employer un vocabulaire précis, clair et rigoureusement défini, afin de ne pas ajouter de confusion terminologique.
- Reporter l'introduction du phénomène de crossing-over jusqu'à ce que les bases de la méiose soient bien maîtrisées, pour éviter les confusions conceptuelles.
- Mettre en lien les mouvements chromosomiques avec les événements cytoplasmiques associés (comme l'action des microtubules ou les changements de volume cellulaire), pour contextualiser les apprentissages.
- Prendre en compte le rôle clé de cette première introduction à la dynamique chromosomique, en assurant une progression didactique rigoureuse et adaptée aux besoins cognitifs des apprenants.

REFERENCES

- [1] Poliakov, E., Cooper, D. N., Stepchenkova, E. I., & Rogozin, I. B. (2015). *Genetics in the Genomic Era*. Genetics Research International, Article ID 364960. <https://doi.org/10.1155/2015/364960>.
- [2] International Human Genome Sequencing Consortium. (2004). Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature*, 431 (7011), 931–945. <https://doi.org/10.1038/nature03001>.
- [3] El Fahime, E., Kartti, S., Chemao-Elfihri, M. W., et al. (2025). Moroccan genome project: Genomic insight into a North African population. *Communications Biology*, 8, 584. <https://doi.org/10.1038/s42003-025-08020-z>.
- [4] Machová, M., & Ehler, E. (2023). Secondary school students' misconceptions in genetics: Origins and solutions. *Journal of Biological Education*, 57 (3), 633–646. <https://doi.org/10.1080/00219266.2021.1933136>.
- [5] Oztas, H., Ozay, E., & Oztas, F. (2003). Teaching cell division to secondary school students: An investigation of difficulties experienced by Turkish teachers. *Journal of Biological Education*, 38 (1), 13–15. <https://doi.org/10.1080/00219266.2003.9655890>.
- [6] Smith, M. U., & Kindfield, A. C. H. (1999). Teaching cell division: Basics & recommendations. *The American Biology Teacher*, 61 (5), 366–371. <https://doi.org/10.2307/4450699>.
- [7] Kenya Institute of Education [KIE]. (1992). *Ministry of Education secondary education syllabus* (Vol. 7). Nairobi: Kenya Literature Bureau.
- [8] Wekesa, D. W., Wekesa, E. W., & Amadalo, M. M. (2013). A computer-mediated simulation module for teaching cell division in secondary school biology. *International Journal of Educational Research and Development*, 2 (5), 114–130.
- [9] Özcan, T., Yildirim, O., & Ozgur, S. (2012). Determining of the university freshmen students' misconceptions and alternative conceptions about mitosis and meiosis. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 46, 3677–3680. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.06.126>
- [10] Kilic, D., & Saglam, N. (2013). Students' understanding of genetics concepts: The effect of reasoning ability and learning approaches. *Journal of Biological Education*, 48 (2), 63–70. <https://doi.org/10.1080/00219266.2013.837402>.

- [11] Hunter, N. (2015). Meiotic recombination: The essence of heredity. *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology*, 7 (12), a016618. <https://doi.org/10.1101/cshperspect.a016618>.
- [12] Newman, D. L., Catavero, C. M., & Wright, L. K. (2012). Students fail to transfer knowledge of chromosome structure to topics pertaining to cell division. *CBE—Life Sciences Education*, 11 (4), 425–436. <https://doi.org/10.1187/cbe.12-01-0003>.
- [13] Guillon, H., Baudat, F., Grey, C., Liskay, R. M., & de Massy, B. (2005). Crossover and noncrossover pathways in mouse meiosis. *Molecular Cell*, 20 (4), 563–573. <https://doi.org/10.1016/j.molcel.2005.09.021>
- [14] Wright, L. K., Cortez, P., Franzen, M. A., & Newman, D. L. (2022). Teaching meiosis with the DNA triangle framework: A classroom activity that changes how students think about chromosomes. *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 50 (1), 44–54. <https://doi.org/10.1002/bmb.21583>.
- [15] Luksa, T., Radanović, I., Garašić, D., & Peris, M. S. (2016). Misconceptions of primary and high school students related to the biological concept of human reproduction, cell life cycle and molecular basis of heredity. *Journal of Turkish Science Education*, 13 (3).
- [16] Stewart, J., & Dale, M. (1989). High school students' understanding of chromosome/gene behavior during meiosis. *Science Education*, 73 (4), 419–430. <https://doi.org/10.1002/sce.3730730410>.
- [17] Ainsworth, S., & VanLabeke, N. (2003). Representation of the cell and its processes in high school students: An integrated view. *International Journal of Science Education*, 25 (2), 269–286.
- [18] Kindfield, A. C. H. (1991). Confusing chromosome number and structure: A common student error. *Journal of Biological Education*, 25, 193–200.
- [19] Smith, M. U. (1991). Teaching cell division: Student difficulties and teaching recommendations. *Journal of College Science Teaching*, 21, 28–33.
- [20] Lewis, J., Leach, J., & Wood-Robinson, C. (s.d.). Chromosomes: The missing link — Young people's understanding of mitosis, meiosis, and fertilisation. *University of Leeds / MST Education College*.
- [21] Lewis, J., Leach, J., & Wood-Robinson, C. (2000). Students' cellular and molecular explanations of genetic phenomena. *Journal of Biological Education*, 34 (4), 200–205. <https://doi.org/10.1080/00219266.2000.9655718>.
- [22] Aldahmash, A. H., & Alshaya, F. S. (2012). Secondary school students' alternative conceptions about genetics. *Electronic Journal of Science Education*, 16 (1), 1–47.
- [23] Saka, A., Cerrah, L., Akdeniz, A. R., & Ayas, A. (2006). A cross-age study of the understanding of three genetic concepts: How do they image the gene, DNA and chromosome? *Journal of Science Education and Technology*, 15 (2), 192–202. <https://doi.org/10.1007/s10956-006-9006-6>.
- [24] Rafat, F., & Ali, M. (s.d.). A study on misconceptions in cell division and reproduction among secondary school students in relation to their preferred teaching styles. *International Journal of Arts and Social Science*. <https://doi.org/10.36537/IJASS/10.5&6/335-340>.
- [25] Foronda, M. S. (2020). Modified Bingo Chromosome Game: An innovative approach in teaching biology. *Universal Journal of Educational Research*, 8 (11B), 5986–5990. <https://doi.org/10.13189/ujer.2020.082234>.
- [26] Wright, L. K., Catavero, C. M., & Newman, D. L. (2017). The DNA triangle and its application to learning meiosis. *CBE—Life Sciences Education*, 16 (3), ar50. <https://doi.org/10.1187/cbe.17-03-0046>.
- [27] Fisher, J. C. (1986). Participation In Educational Activities By Active Older Adults. *Adult Education Quarterly*, 36 (4), 202–210. <https://doi.org/10.1177/0001848186036004002> (Original work published 1986).
- [28] Chapel, G.-E., & Marzin, P. (2009). Étude des connaissances d'élèves de seconde sur les mutations génétiques. Actes des Sixièmes Journées Scientifiques de l'ARDIST, Nantes, France. Laboratoire d'Informatique de Grenoble.
- [29] Chattopadhyay, A. (2012). Understanding of mitosis and meiosis in higher secondary students of Northeast India and the implications for genetics education. *Education*, 2 (3), 41–47. <https://doi.org/10.5923/j.edu.20120203.04>.
- [30] Tsai, C.-C., & Chang, C.-Y. (2007). Assessing the effects of tutorial and edutainment software programs on students' achievements, misconceptions and attitudes towards biology. *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, 8 (1).