



UFR de sciences humaines et arts

—
Master Web éditorial et stratégie UX

Année universitaire 2024-2025

**Effets de la Réalité Augmentée sur la Charge Cognitive et la Performance
d'Apprentissage
Étude Comparative selon les Supports Textuel et Vidéo**

Mémoire de master en « Information, communication »

Présenté par

Sid Ahmed Larbi Youcef

Sous la direction de
Professeur. Nicolas Louveton

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers mes parents, pour leur soutien constant, leur patience et leurs encouragements tout au long de mon parcours. Leur présence a été essentielle à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également ma grand-mère, ainsi que mes tantes, pour leur affection, leur bienveillance et leur soutien indéfectible.

Ce mémoire est dédié à mon oncle, qui nous a quittés cette année. Sa mémoire m'accompagne et continue d'inspirer mes efforts.

Je suis particulièrement reconnaissant envers Monsieur **Nicolas Louveton**, pour sa confiance, son écoute et son accompagnement tout au long de ce mémoire. Je remercie également Monsieur **Yannis Delmas**, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son engagement pédagogique, ainsi que l'ensemble de l'équipe enseignante pour la richesse de leur transmission.

Enfin, merci à toutes les personnes qui m'ont soutenu de près ou de loin durant cette aventure, tant sur le plan académique que personnel.

“L’entrave à l’action fait progresser l’action.
Ce qui s’oppose à la route devient la route.” Marc Aurèle

Table des matières

Remerciements	
Table des matières	
Liste des figures	8
Liste des tableaux	8
Liste des abréviations / sigles	9
Introduction	1
Chapitre I : La Technologie de la Réalité Augmentée	3
1.1 Types de Réalité Augmentée	4
1.1.1 RA basée sur des marqueurs (Reconnaissance d'image)	4
1.1.2 RA sans marqueur (Basée sur la localisation)	4
1.1.3 RA basée sur la projection	4
1.1.4 RA basée sur la superposition	5
1.2 Classification des dispositifs de réalité augmentée	5
Chapitre II: La Charge Cognitive	8
2.1 La Capacité Limitée de la Mémoire de Travail	8
2.2 L'Efficacité de l'Apprentissage et la Performance	9
2.3 Mesure de la Charge Cognitive	10
2.3.1 Échelles d'Auto-évaluation	10
2.3.2 Mesures Physiologiques	10
2.3.3 La méthodologie de double tâche	11
Chapitre III: La Théorie Cognitive de l'Apprentissage Multimédia	13
3.1 Hypothèses fondamentales	13
3.1.1 Hypothèse du Double Canal	13
3.1.2 Hypothèse de la Capacité Limitée	13
3.1.3 Hypothèse de Traitement Actif	14
3.2 Principes Clés de la TCAM qui sont particulièrement pertinents pour la RA:	14
3.2.1 Principe de Contiguïté Spatiale	15
3.2.2 Principe de Contiguïté Temporelle	15
3.2.3 Principe de Signalisation	15
3.2.4 Principe de Redondance	16
3.2.5 Principe de segmentation	16
Chapitre IV: Problématique	17
Hypothèse 1	23
Hypothèse 2	23
Hypothèse 3	24
Hypothèse 4	24
Chapitre V: Méthodologie	25
5.1 Participants	25
5.2 Design expérimental et groupes	25

5.3 Matériel pédagogique et technologie RA	26
5.3.1 Support texte	26
5.3.2 Support vidéo	27
5.3.3 Application de Réalité Augmentée	27
5.4 Instruments de mesure	28
5.5 Déroulement des sessions	29
5.6 Analyse des données	31
Chapitre VI: Résultats	36
6.1 Performance d'apprentissage immédiate (QCM immédiat)	36
6.2 Rétention des connaissances à long terme (QCM à 1 mois)	39
6.3 Charge cognitive et effort mental	40
Chapitre VII: Discussion	44
7.1 Effet de la Réalité Augmentée sur la performance et la charge cognitive	44
7.2 Comparaison des modalités Texte vs. Vidéo à la lumière du double canal	45
7.3 Pertinence pédagogique de la RA dans l'enseignement des sciences	47
7.3.1 Valeur ajoutée de la RA pour les sujets complexes :	47
7.3.2 Multimodalité et engagement :	47
7.3.3 Gestion de la charge cognitive :	48
7.3.4 Personnalisation et remédiation :	48
Chapitre VIII: Limites et Recommandations	50
8.1 Limites de l'étude	50
8.1.1 Taille d'échantillon restreinte :	50
8.1.2 Biais de volontariat :	50
8.1.3 Environnement d'apprentissage non contrôlé :	50
8.1.4 Absence de mesures objectives de la charge cognitive :	51
8.1.5 Durée et étendue de l'apprentissage :	51
8.1.6 Pas de distinction des types de charge cognitive :	51
8.1.7 Analyse statistique limitée :	52
8.1.8 Absence d'un groupe « RA seul » :	52
8.2 Recommandations pour les futures recherches	53
8.2.1 Élargir l'échantillon et la diversité des participants :	53
8.2.2 Varier les domaines d'apprentissage et la durée :	53
8.2.3 Mesures de charge cognitive plus fines :	53
8.2.4 Approche mixte quantitative-qualitative :	54
8.2.5 Contrôler l'effet de nouveauté :	54
8.2.6 Exploration de la RA seule et de différentes combinaisons:	54
8.2.7 Élargissement à d'autres contenus et disciplines :	55
8.2.8 Études longitudinales :	55
8.2.9 Qualité de l'intégration pédagogique de la RA :	55
8.2.10 Comparaison coût-bénéfice :	56
Conclusion	57

Bibliographie	60
Livres	60
Articles	60
Web	63
Annexes	65
Annexe A – Formulaire de consentement des participants	65
Annexe B – Support Texte	67
Annexe C – Extrait des réponses au formulaire en ligne (informations sensibles masquées)	72
Annexe D – Questionnaire à choix multiple (QCM)	73
Annexe E – Tableau récapitulatif des performances expérimentales	77
Résumé	78

Liste des Figures

Figure 1: Continuum de Milgram	3
Figure 2: Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia selon Mayer (2014)	16
Figure 3 : Distribution des publications scientifiques liées à la réalité augmentée dans l'éducation et la charge cognitive sur Google Scholar	22
Figure 4 : Interface de l'application McGraw-Hill AR montrant un modèle 3D de chloroplaste en coupe, avec identification des structures internes telles que les thylakoïdes et les membranes.	28
Figure 5 : Formule du test de Kruskal-Wallis (statistique H)	33
Figure 6 : Scores moyens au QCM immédiat (sur 16) par groupe	36
Figure 7 : Scores moyens du QCM (sur 16) par groupe (à 1 mois)	39
Figure 8 : Scores de charge cognitive rapportée selon le type de support d'apprentissage (NASA-TLX)	41

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Synthèse des études récentes sur l'utilisation de la RA dans l'éducation	21
Tableau 2 : Scores moyens au QCM immédiat et à 1 mois, et score du NASA-TLX.	37
Tableau 3 : Scores Dunn-Bonferroni-Tests au QCM immédiat avec Adj.p etant les valeurs ajustées avec la correction de Bonferroni.	38
Tableau 4 : Scores Dunn-Bonferroni-Tests au QCM apres 1 mois avec Adj.p etant les valeurs ajustées avec la correction de Bonferroni.	40
Tableau 5 : Scores Dunn-Bonferroni-Tests au NASA-TLX avec Adj.p etant les valeurs ajustées avec la correction de Bonferroni.	42

Liste des Abréviations / Sigles

ANOVA – *Analyse de la variance* (test statistique paramétrique permettant de comparer des moyennes de plusieurs groupes)

EEG – *Électroencéphalogramme* (mesure de l'activité électrique cérébrale)

GPS – *Système de positionnement global* (Global Positioning System)

HMD – *Casque d'affichage monté sur la tête* (Head-Mounted Display)

HUD – *Affichage tête haute* (Head-Up Display)

MAR – *Réalité augmentée mobile* (de l'anglais *Mobile Augmented Reality*, application de RA sur appareils mobiles)

SLAM – *Localisation et cartographie simultanées* (Simultaneous Localization And Mapping)

NASA-TLX – *NASA Task Load Index*, indice d'évaluation de la charge de travail cognitive (questionnaire multidimensionnel développé par la NASA pour mesurer la charge mentale perçue).

QCM – *Questionnaire à choix multiple* (évaluation des connaissances par questions à options prédéfinies)

QR – *Code à réponse rapide* (Quick Response)

RA – *Réalité augmentée* (technique incorporant des éléments virtuels dans le monde réel en temps réel).

RV – *Réalité virtuelle* (environnement virtuel immersif simulé par ordinateur)

TCAM – *Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia* (théorie de Richard E. Mayer sur l'apprentissage à partir de supports multimodaux)

VFC – *Variabilité de la Fréquence Cardiaque*

VRD – *Affichage rétinien virtuel* (Virtual Retinal Display)

Introduction

L'intérêt grandissant pour les technologies de réalité augmentée (RA) attire des investissements considérables de la part d'acteurs clés comme Meta, Apple ou Microsoft. Autrefois considérée comme de la science-fiction, la RA est de plus en plus intégrée dans les usages quotidiens, notamment dans les domaines de la consommation, de l'éducation et du divertissement. Le marché mondial de la réalité augmentée devrait connaître une croissance significative. Les estimations indiquent des prévisions de revenus de 599,59 milliards de dollars d'ici 2030¹. Cette avancée rapide indique une adoption généralisée de la RA, désormais considérée comme un instrument essentiel pour optimiser l'interaction des utilisateurs avec leur environnement, que ce soit en matière de consommation, de divertissement ou d'éducation.

Dans le secteur éducatif, la réalité augmentée présente des possibilités pour transformer radicalement les techniques d'enseignement et propose des horizons inexplorés pour réinventer les stratégies pédagogiques. En autorisant l'alignement de modèles 3D virtuels ou de données interactives avec la réalité, elle propose aux apprenants des méthodes novatrices pour comprendre des concepts abstraits. Plusieurs recherches suggèrent que l'apprentissage immersif favorise la compréhension de concepts complexes, contribuant à rendre l'apprentissage de concepts complexes plus accessible. La RA apparaît donc comme un progrès significatif dans ce domaine, offrant la possibilité de transformer les modalités traditionnelles d'enseignement en une expérience plus interactive, tangible et immersive².

Toutefois, comme pour toute avancée technologique, il est important d'analyser ses conséquences possibles, notamment en ce qui concerne l'impact cognitif sur les apprenants. Une intégration mal adaptée de la réalité augmentée pourrait engendrer une surcharge d'informations ou des distractions, à l'inverse d'une utilisation contrôlée qui pourrait réduire la charge cognitive nécessaire pour l'apprentissage. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude³.

Notre objectif est d'analyser minutieusement l'effet de la réalité augmentée sur le processus éducatif et la charge cognitive des étudiants. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons mis en place une étude expérimentale contrôlée visant à évaluer l'acquisition d'un concept scientifique 'la photosynthèse' avec ou sans recours à la réalité augmentée. Nous visons à clarifier l'impact de la RA sur les mécanismes cognitifs impliqués dans

¹ Augmented Reality Market Size, Share & Trends Report 2030, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/augmented-reality-market> [consulté le 2 novembre 2024].

² JANTANUKUL, Watcharaporn, 2024. Immersive Reality in Education: Transforming Teaching and Learning through AR, VR, and Mixed Reality Technologies. *Journal of Education and Learning Reviews*. Vol. 1, no 2, pp. 51-62. DOI [10.60027/jelr.2024.750](https://doi.org/10.60027/jelr.2024.750).

³ BUCHNER, Josef, BUNTINS, Katja et KERRES, Michael, 2022. The impact of augmented reality on cognitive load and performance: A systematic review. *Journal of Computer Assisted Learning*. Vol. 38, no 1, pp. 285-303. DOI [10.1111/jcal.12617](https://doi.org/10.1111/jcal.12617).

l'apprentissage mis en jeu lors de l'acquisition de nouvelles connaissances, et d'établir des indicateurs objectifs pour mesurer son efficacité pédagogique dans un contexte donné.

Nous posons, en conséquence, la question de recherche suivante : **Comment l'usage de la réalité augmentée, en fonction du type de support pédagogique (texte ou vidéo), influence-t-il les différentes formes de charge cognitive ainsi que la performance d'apprentissage immédiate et différée ?**

Le mémoire s'organise en sept chapitres suivis d'une conclusion générale. Les trois premiers posent le cadre théorique : la RA (Chapitre 1), la charge cognitive (Chapitre 2) et la théorie cognitive de l'apprentissage multimédia (Chapitre 3). Le Chapitre 4 formule la problématique et les hypothèses issues de la littérature. Le Chapitre 5 décrit la méthodologie expérimentale. Les Chapitres 6 et 7 présentent respectivement les résultats et leur discussion. L'ensemble se conclut par une synthèse générale, incluant les limites de l'étude et des pistes de recherche.

Chapitre I: La technologie de la réalité augmentée

La Réalité Augmentée (RA) est une technologie qui enrichit l'environnement du monde réel en y superposant en temps réel des informations numériques, telles que des images, des sons et d'autres stimuli sensoriels. Cette intégration d'éléments virtuels dans le monde physique permet aux utilisateurs d'interagir simultanément avec les deux, créant ainsi une expérience immersive qui peut améliorer considérablement l'apprentissage et l'engagement, comme l'a souligné Milgram.⁴ Ces types d'interfaces informatiques peuvent être placés tout au long d'un continuum selon le degré de génération informatique de l'environnement de l'utilisateur.



Figure 1: Continuum de Milgram⁵

La RA se distingue de la réalité virtuelle (RV), davantage en présentant des interfaces numériques tridimensionnelles (3D) et des objets virtuels qui s'intègrent harmonieusement au monde réel, offrant des moyens dynamiques et innovants pour interagir avec notre environnement.

La RA se situe entre l'environnement réel et virtuel, et l'état entre ces deux environnements est appelé "réalité mixte". Une réalité mixte intègre des informations numériques dans l'environnement réel. Selon Ronald Azuma⁶, La RA fusionne les deux types d'objets en 2D ou 3D, conduisant à une interaction en temps réel qui reflète la réalité mixte dans le continuum de la RA de Milgram. Les utilisateurs commencent à expérimenter un environnement virtuel immersif à mesure que le point se déplace vers la droite, menant à l'environnement virtuel. Des objets réels sont ajoutés aux objets virtuels au sein de l'environnement virtuel pour compléter l'arrière-plan.

⁴ A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, 2024ResearchGate [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/231514051_A_Taxonomy_of_Mixed_Reality_Visual_Displays [consulté le 4 octobre 2024]. (PDF).

⁵ Continuum de Milgram. © Milgram & Kishino 1994., ResearchGate [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/figure/Continuum-de-Milgram-C-Milgram-Kishino-1994_fig2_347353380 [consulté le 3 janvier 2025].

⁶ AZUMA, Ronald. T. A Survey of Augmented Reality. <https://www.cs.unc.edu/~azuma/ARpresence>. (PDF).

1.1. Types de Réalité Augmentée

1.1.1 RA basée sur des marqueurs (Reconnaissance d'image)

Elle nécessite un objet visuel spécifique, qui peut aller d'un code Quick Response (QR) imprimé à des symboles spécialisés. Les applications basées sur des marqueurs utilisent la caméra d'un dispositif pour identifier le marqueur parmi d'autres objets du monde réel et y superposer des informations. Par exemple, les codes QR sont couramment utilisés comme marqueurs car ils sont faciles à reconnaître et nécessitent une puissance de traitement minimale. Dans certains cas, le dispositif de RA détermine également la position et l'orientation du marqueur pour placer précisément le contenu.

1.1.2 RA sans marqueur (Basée sur la localisation)

Cette technologie utilise divers capteurs et algorithmes pour détecter et superposer des objets virtuels sur des environnements réels en fonction de la position et de l'orientation de l'utilisateur, et peut fonctionner efficacement tant en intérieur qu'en extérieur, exploitant le GPS, les boussoles numériques et les accéléromètres. Contrairement à la RA basée sur les marqueurs, qui s'appuie sur des motifs identifiables pour déclencher l'affichage d'éléments virtuels, la RA sans marqueurs emploie des techniques telles que l'extraction de caractéristiques, l'estimation de la pose de la caméra et la localisation et cartographie simultanées (SLAM) pour réaliser une intégration transparente des éléments virtuels et réels.

En éliminant la nécessité de marqueurs imprimés, les chercheurs ont réussi à réduire les coûts et à résoudre les défis associés aux applications de RA basée sur les marqueurs. Un exemple notable est l'étude menée par Abdinejad, Maryam et al⁷, qui souligne les lacunes des méthodes traditionnelles de visualisation pour aider les étudiants à comprendre les structures moléculaires 3D et leur réactivité. Pour résoudre ce problème, les chercheurs ont initialement développé une application de RA basée sur les marqueurs, ARchemy, pour les appareils mobiles, permettant aux étudiants de visualiser les structures moléculaires en 3D. Cette application innovante a non seulement réduit les coûts mais a également amélioré l'utilisabilité en éliminant le besoin de marqueurs physiques. Les étudiants pouvaient visualiser les structures moléculaires directement dans l'application sans nécessiter de codes imprimés pour chaque structure spécifique, rendant l'outil plus intuitif et convivial.

1.1.3 RA basée sur la projection

Elle améliore l'environnement réel en projetant des objets virtuels directement sur des surfaces physiques, créant une expérience immersive où les éléments numériques se fondent harmonieusement avec la réalité. Contrairement aux systèmes de RA traditionnels qui reposent sur des écrans ou des visiocasques, cette approche utilise des projecteurs pour

⁷ ABDINEJAD, Maryam et al., 2021. Developing a Simple and Cost-Effective Markerless Augmented Reality Tool for Chemistry Education. Journal of Chemical Education. Vol. 98, no 5, pp. 1783-1788. DOI [10.1021/acs.jchemed.1c00173](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00173).

afficher des images sur des surfaces, permettant une interaction plus naturelle et interactive avec le contenu.

Un avantage majeur de la RA par projection est sa capacité à créer des expériences partagées sans nécessiter d'appareils personnels. Cela la rend particulièrement efficace dans des environnements comme les musées, où plusieurs utilisateurs peuvent interagir simultanément avec des artefacts historiques ou des expositions interactives, améliorant ainsi l'engagement et l'apprentissage.

Cependant, cette technologie n'est pas sans défis. L'exigence d'installations spécifiques et de surfaces de projection appropriées peut être contraignante, limitant sa versatilité. De plus, des distorsions géométriques peuvent survenir sur des surfaces irrégulières ou non préparées, affectant la clarté et la perception des objets virtuels.

1.1.4 RA basée sur la superposition

Elle remplace la vue originale d'un objet, partiellement ou totalement, par une version augmentée du même objet. Dans la réalité augmentée basée sur la superposition, la reconnaissance d'objets est cruciale, car l'application doit identifier l'objet avec précision pour modifier ou remplacer son apparence par des éléments augmentés, contrairement aux autres types de RA qui ajoutent principalement du nouveau contenu numérique à la scène. Dans le domaine médical, ce type de RA a montré un potentiel significatif, particulièrement dans les applications chirurgicales améliorant la capacité du chirurgien à prendre des décisions éclairées en fournissant un guidage visuel en temps réel, améliorant ainsi la précision et la sécurité des interventions chirurgicales.^{8,9,10}

1.2 Classification des dispositifs de réalité augmentée

L'évolution de la Réalité Augmentée a conduit au développement de divers dispositifs capables de fusionner le contenu numérique avec notre monde physique. Ces dispositifs vont des technologies portables aux appareils mobiles quotidiens, chacun offrant des façons uniques d'expérimenter la RA. Voici un aperçu des principales catégories de dispositifs compatibles avec la RA :

1. Les lunettes de RA (lunettes intelligentes)

⁸ TIAN, Nai-Feng et XU, Hua-Zi, 2009. Image-guided pedicle screw insertion accuracy: a meta-analysis. *International Orthopaedics*. Vol. 33, no 4, pp. 895-903. DOI [10.1007/s00264-009-0792-3](https://doi.org/10.1007/s00264-009-0792-3).

⁹ MOLINA, Camilo A. et al., 2021. A cadaveric precision and accuracy analysis of augmented reality-mediated percutaneous pedicle implant insertion. *Journal of Neurosurgery. Spine*. Vol. 34, no 2, pp. 316-324. DOI [10.3171/2020.6.SPINE20370](https://doi.org/10.3171/2020.6.SPINE20370).

¹⁰ MOLINA, Camilo A. et al., 2019. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: a cadaveric proof-of-concept study. *Journal of Neurosurgery. Spine*. Vol. 31, no 1, pp. 139-146. DOI [10.3171/2018.12.SPINE181142](https://doi.org/10.3171/2018.12.SPINE181142).

Les lunettes intelligentes sont des dispositifs portables qui superposent des informations numériques sur le champ de vision de l'utilisateur. Elles comportent généralement des écrans transparents qui permettent aux utilisateurs de voir simultanément le monde réel et les éléments virtuels. Ces appareils sont capables d'afficher des notifications provenant de notre smartphone, d'accéder au contenu en mains libres etc., mais leur encombrement et leur coût peuvent limiter leur adoption généralisée. Pour n'en citer que quelques-unes, les Google Glasses, les Meta 2 Glasses, l'Apple Vision, les Laster See-Thru, les Microsoft Holo Lenses, etc.

2. Lentilles de RA (lentilles intelligentes)

Les lentilles intelligentes représentent une forme plus avancée et moins intrusive de la technologie de RA. Ces lentilles visent à fournir une intégration transparente des informations numériques directement sur la rétine de l'utilisateur, offrant potentiellement une expérience visuelle plus naturelle par rapport aux lunettes. Bien qu'encore largement en phase expérimentale, les lentilles intelligentes pourraient révolutionner la façon dont les utilisateurs interagissent avec le contenu numérique en éliminant le besoin d'appareils externes. Cependant, les défis liés à l'alimentation électrique, à la résolution d'affichage et au confort de l'utilisateur restent des obstacles importants à leur développement.

Samsung et Sony ont annoncé le développement de lentilles de RA. Respectivement, Samsung travaille sur des lentilles embarquant une caméra¹¹, tandis que Sony conçoit des lentilles comme des dispositifs de RA autonomes¹² (avec des fonctionnalités comme la prise de photos ou le stockage de données).

3. Affichage rétinien virtuel (VRD)

Les VRD utilisent une approche différente en projetant des images directement sur la rétine à l'aide de la technologie laser. Cette méthode permet d'obtenir des images haute résolution et un large champ de vision tout en maintenant une conception légère.

Les VRD peuvent fournir une expérience de RA immersive sans l'encombrement des visiocasques traditionnels. Cependant, la technologie est encore en évolution, et des questions telles que la sécurité oculaire et le besoin d'un calibrage précis doivent être résolues avant une utilisation généralisée. Ces systèmes restent encore à développer pour un usage pratique.

4. Dispositifs AR spéciaux

¹¹ Bastien, L. 2019. Samsung invente des lentilles de contact à réalité augmentée avec caméra. REALITE-VIRTUELLE.COM [en ligne]. 30 juillet 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.realite-virtuelle.com/samsung-lentilles-contact-ar-camera/> [consulté le 16 décembre 2024].

¹² COLLA, Sofia, 2017. Ces lentilles de contact intelligentes transforment vos yeux en appareil photo. WE DEMAINE [en ligne]. 7 avril 2017. Disponible à l'adresse : https://www.wedemain.fr/inventer/ces-lentilles-de-contact-intelligentes-transforment-vos-yeux-en-appareil-photo_a2625-html/ [consulté le 16 décembre 2024].

Ils englobent une gamme de matériel dédié conçu spécifiquement pour les applications de RA. Ces dispositifs peuvent inclure des visiocasques (HMD), des projecteurs et d'autres équipements spécialisés qui améliorent l'expérience de RA. Un exemple est l'affichage tête haute (HUD), envoyant des données sur un écran transparent directement dans le champ de vision de l'utilisateur. Initialement introduit pour former les pilotes de chasse militaires, ces dispositifs ont maintenant des applications dans l'aviation, l'industrie automobile, la fabrication et le sport.

5. Appareils mobiles

Les smartphones et les tablettes sont actuellement les plateformes les plus largement utilisées pour les applications de RA en raison de leur accessibilité et de leurs capteurs intégrés, tels que les caméras et le GPS. La RA mobile (mAR) exploite ces fonctionnalités pour fournir des expériences de RA basées sur la localisation et sans marqueurs, la rendant adaptée à un large éventail d'applications comme la navigation, les applications éducatives, les jeux, le divertissement, l'analyse commerciale, le sport, les réseaux sociaux, etc.

La disponibilité généralisée des smartphones a maintenant rendu la mAR plus accessible que jamais, particulièrement pour les jeunes générations qui sont habiles à utiliser ces technologies. Son accessibilité améliore le potentiel éducatif de la RA, car elle peut transformer les environnements d'apprentissage traditionnels en expériences interactives qui engagent les utilisateurs plus efficacement. Par exemple, des études ont montré que la mAR peut améliorer les résultats d'apprentissage en fournissant des simulations interactives qui permettent aux utilisateurs de visualiser des concepts complexes de manière plus tangible¹³. Cette efficacité peut être mieux comprise à travers le prisme de la théorie de la charge cognitive et des principes de l'apprentissage multimédia, qui explore comment les individus traitent et retiennent l'information.

¹³ Augmented Reality in Science Laboratories: Investigating High School Students' Navigation Patterns and Their Effects on Learning Performance . DOI [10.1177/07356331211038764](https://doi.org/10.1177/07356331211038764).

Chapitre II: La charge cognitive

La charge cognitive fait référence à la quantité d'effort mental utilisée dans la mémoire de travail pendant les tâches d'apprentissage ou de résolution de problèmes. C'est un concept crucial en psychologie de l'éducation, particulièrement dans le contexte de la conception pédagogique, car il influence directement l'efficacité des expériences d'apprentissage. La théorie de la charge cognitive, principalement développée par John Sweller¹⁴, postule que l'apprentissage est plus efficace lorsque la charge cognitive est optimisée, permettant aux apprenants de traiter l'information sans être submergés.

On distingue 3 types de charge cognitive:

1. La charge cognitive intrinsèque

Elle fait référence à la difficulté innée de la tâche. Par exemple, rappeler que les poissons clowns vivent dans les anémones serait une faible charge intrinsèque, alors qu'expliquer pourquoi les deux espèces en bénéficient serait un niveau de charge intrinsèque plus élevé.

2. La charge cognitive extrinsèque

Elle concerne le matériel et l'environnement auxquels nous soumettons les étudiants. Des matériels mal construits et des environnements de classe chargés peuvent conduire à un effet de division de l'attention et ajouter à une charge cognitive superflue. Il est de notre devoir de réduire cela dans la façon dont nous présentons nos leçons. En termes simples, l'effet d'attention partagée est la distraction générée par l'utilisation d'un trop grand nombre de principes contradictoires. Cela nuit à la charge cognitive.

3. La charge cognitive pertinente

Représente ce que nous voulons réellement qu'il se produise, c'est la capacité de la mémoire de travail à lier de nouvelles idées avec des informations dans la mémoire à long terme. Plus un étudiant possède de connaissances préalables, plus l'étape de chargement pertinente est efficace. C'est dans cette charge que les stratégies métacognitives entrent en jeu, c'est là que les étudiants sont conscients de leurs processus de réflexion et capables d'adapter les nouvelles informations en conséquence¹⁵.

2.1 La Capacité Limitée de la Mémoire de Travail

La théorie de la charge cognitive est intrinsèquement liée à la structure et aux limitations de notre mémoire de travail. Les travaux fondamentaux de George Miller (1956)

¹⁴ Sweller, John, Ayres, Paul et Kalyuga, Slava, 2011. Cognitive Load Theory. New York, NY : Springer. ISBN 978-1-4419-8125-7.

¹⁵ Éric Jamet, Olivier Le Bohec, Cédric Hidrio, Comment présenter l'information dans les documents numériques éducatifs ? Une approche de psychologie cognitive Dans Document numérique, 2003/1 (Vol. 7), pages 25 à 38 Éditions Lavoisier

ont démontré que la mémoire de travail ne peut traiter que $7 (\pm 2)$ éléments d'information simultanément. Cette limitation, connue sous le nom de "nombre magique de Miller", est fondamentale pour comprendre les contraintes du traitement cognitif pendant l'apprentissage.

Au-delà de cette capacité limitée en termes de quantité, la mémoire de travail est également contrainte par la durée pendant laquelle elle peut maintenir ces informations - généralement de l'ordre de quelques secondes si l'information n'est pas activement répétée ou traitée. Ces limitations de la mémoire de travail constituent la base théorique qui justifie l'importance de gérer efficacement la charge cognitive dans les situations d'apprentissage.

2.2 L'Efficacité de l'Apprentissage et la Performance

La relation entre la charge cognitive et les résultats d'apprentissage est fondamentale pour comprendre pourquoi la gestion de la charge cognitive est importante dans l'éducation. Lorsque les apprenants expérimentent une charge cognitive optimale, ils peuvent traiter, comprendre et retenir efficacement de nouvelles informations. À l'inverse, une charge cognitive excessive dépasse la capacité de la mémoire de travail, réduisant la compréhension, la rétention et les capacités de résolution de problèmes. Cela se traduit souvent par une exécution plus lente des tâches, une augmentation des erreurs et une difficulté à appliquer les concepts appris à de nouvelles situations.

Cette synergie est essentielle pour les éducateurs et les concepteurs pédagogiques, car elle influence directement la façon dont les étudiants acquièrent et appliquent de nouvelles connaissances et compétences. La surcharge cognitive, un processus qui se produit lorsque les exigences imposées à la mémoire de travail dépassent sa capacité, conduisant à des difficultés dans le traitement de l'information, est particulièrement problématique dans les tâches complexes qui exigent le traitement simultané de multiples éléments d'information ou une prise de décision rapide, car une charge cognitive excessive entrave l'acquisition de schémas, un facteur clé dans la compréhension et la résolution de problèmes. La charge cognitive affecte également les capacités de résolution de problèmes et l'acquisition de compétences des apprenants. Une charge cognitive élevée peut entraver le développement de l'automatisme des compétences, qui est essentielle pour une résolution efficace des problèmes, et à mesure que les tâches deviennent automatiques, elles nécessitent moins d'effort cognitif, permettant aux apprenants d'allouer des ressources cognitives à des tâches plus complexes. À l'inverse, lorsque la charge cognitive est élevée, les apprenants peuvent trouver difficile d'appliquer efficacement les compétences acquises, conduisant à de moins bonnes performances dans les scénarios de résolution de problèmes. Comprendre la relation entre l'efficacité de l'apprentissage et la performance est crucial pour comprendre ses influences sur la compréhension, la rétention, les capacités de résolution de problèmes, l'acquisition de compétences et les résultats d'évaluation. Dans cet esprit, les éducateurs peuvent concevoir des stratégies d'enseignement plus efficaces qui optimisent les expériences d'apprentissage et améliorent les résultats éducatifs globaux en mesurant et en gérant la charge cognitive.

2.3 Mesure de la Charge Cognitive

Le processus de mesure aide à identifier la charge cognitive extrinsèque, plusieurs méthodes ont été développées pour mesurer la charge cognitive, chacune avec ses forces et ses limites.

2.3.1 Échelles d'Auto-évaluation

L'une des méthodes les plus courantes pour mesurer la charge cognitive est l'utilisation d'échelles d'auto-évaluation subjectives, qui sont simples à administrer et peuvent être facilement intégrées dans divers contextes d'apprentissage. Elles permettent aux apprenants de fournir un retour immédiat sur leur charge cognitive pendant ou après les tâches d'apprentissage, ce qui en fait un choix pratique pour les éducateurs.¹⁶ Par exemple, le NASA Task Load Index (NASA-TLX) est un outil d'auto-évaluation couramment utilisé qui évalue plusieurs dimensions de la charge cognitive, notamment la demande mentale, la demande physique et la frustration, ou l'échelle de Paas, qui demande aux apprenants d'évaluer leur charge cognitive perçue pendant les tâches d'apprentissage. Cependant, ces échelles d'auto-évaluation captent les expériences subjectives de la charge cognitive des apprenants, qui peuvent différer significativement des mesures objectives. Cette perspective subjective est cruciale, car elle reflète la façon dont les apprenants perçoivent leur effort cognitif et les défis auxquels ils font face pendant l'apprentissage et bien que ces échelles offrent des aperçus précieux, elles ont aussi des limites. Une préoccupation est le potentiel de biais dans les auto-évaluations des apprenants, qui peuvent ne pas refléter précisément leur charge cognitive.

2.3.2 Mesures Physiologiques

Mesurer la charge cognitive par des mesures physiologiques est un domaine de recherche de plus en plus important en psychologie de l'éducation. Les mesures physiologiques fournissent des données objectives sur la charge cognitive, permettant aux chercheurs et aux éducateurs de comprendre comment la fatigue mentale affecte l'apprentissage et la performance. Elles englobent une gamme de techniques qui surveillent les réponses corporelles pour évaluer la charge cognitive, telles que:

- **L'électroencéphalographie (EEG)**

Une méthode largement utilisée pour mesurer l'activité cérébrale et qui s'est révélée efficace dans la détection de la fatigue mentale.

- **La Variabilité de la Fréquence Cardiaque (VFC)**

Elle mesure la variation du temps entre les battements cardiaques et est considérée comme un indicateur fiable de l'activité du système nerveux autonome.

- **La Pupillométrie**

¹⁶ PAAS, Fred et al., 2003. Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. Educational Psychologist. Vol. 38, no 1, pp. 63-71. DOI [10.1207/S15326985EP3801_8](https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8).

Une technique qui implique la mesure des changements du diamètre pupillaire, qui peut indiquer la charge cognitive et l'effort mental.

Bien que les mesures physiologiques offrent des aperçus précieux de la charge cognitive, des défis persistent dans leur mise en œuvre. L'un des principaux défis de l'utilisation des mesures physiologiques pour évaluer la charge cognitive est la complexité de l'interprétation des données. Les réponses physiologiques, telles que la variabilité de la fréquence cardiaque (VFC), l'électroencéphalographie (EEG) et la pupillométrie, peuvent être influencées par divers facteurs au-delà de la charge cognitive, notamment les états émotionnels, l'activité physique et les conditions environnementales. Par exemple, une étude a montré que les réponses de la fréquence cardiaque peuvent refléter la charge cognitive, mais elles sont significativement influencées par l'anxiété et la dépression, ce qui peut compliquer leur utilisation comme indicateurs autonomes dans les évaluations de la santé mentale et cognitive¹⁷. En outre, l'utilisation de telles mesures nécessite souvent un équipement spécialisé qui peut ne pas être facilement disponible dans tous les contextes éducatifs, et cette limitation peut entraver leur adoption généralisée dans les salles de classe ou les environnements de formation, rendant l'installation et le calibrage de ces équipements chronophages et nécessitant du personnel formé, compliquant davantage leur utilisation dans les applications pratiques.

2.3.3 La méthodologie de double tâche

La méthodologie de double tâche est une approche de recherche utilisée pour étudier la charge cognitive et ses effets sur la performance lorsque les individus s'engagent simultanément dans deux tâches. Elle est particulièrement utile pour comprendre l'interaction entre les tâches cognitives et motrices et comment l'interférence de la double tâche impacte la performance globale. Cette méthodologie permet aux chercheurs d'évaluer l'impact cognitif en comparant la performance sur des tâches simples par rapport aux doubles tâches.

Des diminutions liées à l'âge dans la performance de double tâche ont été documentées, les adultes plus âgés montrant une interférence de double tâche plus significative par rapport aux jeunes adultes. Brustio et al. ont souligné que les adultes plus âgés ont souvent du mal à allouer efficacement les ressources attentionnelles dans les conditions de double tâche, conduisant à une performance altérée¹⁸.

De plus, les individus peuvent prioriser une tâche par rapport à une autre pendant les scénarios de double tâche, influençant les résultats de performance globale. Par exemple, Plummer et al. ont démontré que les adultes plus âgés qui priorisaient les tâches cognitives pendant la marche en double tâche manifestaient une

¹⁷ ALSHANSKAIA, Evgeniia I. et al., 2024. Heart rate response to cognitive load as a marker of depression and increased anxiety. *Frontiers in Psychiatry*. Vol. 15. DOI [10.3389/fpsyt.2024.1355846](https://doi.org/10.3389/fpsyt.2024.1355846).

¹⁸ BRUSTIO, Paolo Riccardo et al., 2017. Age-related decrements in dual-task performance: Comparison of different mobility and cognitive tasks. A cross sectional study. LÓPEZ LLUCH, Guillermo (éd.), *PLOS ONE*. Vol. 12, no 7, p. e0181698. DOI [10.1371/journal.pone.0181698](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181698).

plus grande confiance en leur équilibre que ceux qui se concentraient sur les tâches motrices¹⁹.

Cependant, une limitation notable de la méthodologie de double tâche est sa faible fiabilité qui peut provenir de l'inflation des erreurs, car les erreurs systématiques dans les mesures de performance de tâche simple et double se combinent lors du calcul de l'interférence proportionnelle de double tâche²⁰.

¹⁹ (PDF) Measuring treatment effects on dual-task performance: a framework for research and clinical practice, 2024ResearchGate. DOI [10.3389/fnhum.2015.00225](https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00225).

²⁰ YANG, L. et al., 2015. Psychometric properties of dual-task balance assessments for older adults: A systematic review. *Maturitas*. Vol. 80, no 4, pp. 359-369. DOI [10.1016/j.maturitas.2015.01.001](https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2015.01.001).

Chapitre III: La théorie cognitive de l'apprentissage multimédia

Pour comprendre comment cette triade de RA, d'apprentissage et de cognition peut aider les sujets à mieux apprendre, il est important pour nous d'établir que les gens apprennent plus efficacement à partir de mots et d'images qu'à partir de mots seuls, comme le postule la théorie de l'apprentissage multimédia, qui a gagné une attention significative dans la recherche éducative, particulièrement en raison de ses implications pour améliorer l'engagement et la compréhension des étudiants.

La Théorie Cognitive de l'Apprentissage Multimédia de Mayer (TCAM)²¹, qui postule que l'instruction multimédia efficace doit être conçue avec une compréhension de la façon dont les gens traitent l'information à travers les mots et les images, souligne l'importance de la gestion de la charge cognitive et de l'intégration des informations verbales et visuelles pour faciliter les résultats d'apprentissage.

3.1 Hypothèses fondamentales

La TCAM est construite sur trois hypothèses fondamentales concernant la façon dont l'esprit humain traite l'information :

3.1.1 Hypothèse du Double Canal

Les humains possèdent des canaux séparés pour traiter l'information visuelle et auditive. Cette hypothèse, basée sur la Théorie du Double Codage de Paivio²², suggère que l'information visuelle/picturale et auditive/verbale est traitée à travers des canaux cognitifs distincts. Ce principe est soutenu par la recherche empirique démontrant que les apprenants qui s'engagent avec des matériels multimédias ont tendance à obtenir de meilleurs résultats aux tests de compréhension et de rétention par rapport à ceux qui utilisent des formats textuels uniquement. Dans les contextes de RA, cela signifie que les apprenants peuvent traiter simultanément les superpositions visuelles et les explications verbales qui les accompagnent.

3.1.2 Hypothèse de la Capacité Limitée

Chaque canal de traitement possède une capacité limitée de traitement de l'information à un moment donné. Cette caractéristique est en adéquation avec la théorie de la charge cognitive et suggère qu'une surcharge de l'un ou l'autre des canaux peut conduire à une surcharge cognitive. Les recherches de Mayer et al. mettent en évidence que lorsque les apprenants sont exposés à un volume de matière supérieur à leur capacité cognitive, leur compréhension peut effectivement se

²¹ MAYER, Richard E., 2024. The Past, Present, and Future of the Cognitive Theory of Multimedia Learning. Educational Psychology Review. Vol. 36, no 1, p. 8. DOI [10.1007/s10648-023-09842-1](https://doi.org/10.1007/s10648-023-09842-1).

²² Dual-coding theory, 2024Wikipedia [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dual-coding_theory&oldid=1254899468 [consulté le 13 décembre 2024]. Page Version ID: 1254899468

détériorer. Ce phénomène est communément désigné sous le terme d'« effet de surcharge cognitive », où le traitement simultané des informations visuelles et auditives peut dépasser les limites de la mémoire de travail, entraînant des résultats d'apprentissage moins efficaces²³. Cette considération est particulièrement pertinente pour les applications de réalité augmentée, où l'équilibre entre les informations du monde réel et les informations virtuelles doit être soigneusement géré. Dans ces environnements, la surcharge cognitive peut compromettre l'efficacité de l'interaction utilisateur et réduire la capacité d'apprentissage ou de traitement de l'information.

3.1.3 Hypothèse de Traitement Actif

Elle postule que l'apprentissage significatif se produit lorsque les apprenants s'engagent activement dans des processus cognitifs durant l'expérience d'apprentissage. Cela implique de sélectionner des informations pertinentes, de les organiser en structures mentales cohérentes et de les intégrer avec les connaissances antérieures. L'hypothèse souligne que les apprenants ne doivent pas simplement recevoir passivement l'information, mais doivent interagir avec elle pour construire leur compréhension. Des études empiriques ont apporté un soutien substantiel à cette hypothèse. Par exemple, Mayer et Moreno ont démontré que la personnalisation dans l'apprentissage multimédia — où les supports d'instruction sont présentés dans un style conversationnel — encourage les apprenants à s'engager plus activement avec le contenu. Leurs résultats ont indiqué que les étudiants ayant appris à partir de matériels personnalisés ont obtenu de meilleurs résultats que ceux ayant appris à partir de présentations formelles, soulignant le rôle de l'engagement cognitif actif dans l'amélioration des résultats d'apprentissage²⁴.

3.2 Principes Clés de la TCAM qui sont particulièrement pertinents pour la RA:

Plusieurs principes clés de la Théorie Cognitive de l'Apprentissage Multimédia (TCAM) ont des implications directes pour les applications de RA dans les contextes éducatifs, ces principes fournissent un cadre pour comprendre comment concevoir des matériels éducatifs qui améliorent l'apprentissage efficacement.

3.2.1 Principe de Contiguïté Spatiale

Ce principe affirme que les apprenants apprennent mieux lorsque les mots et les images correspondants sont présentés à proximité plutôt qu'éloignés. La logique

²³ Cognitive Constraints on Multimedia Learning: When Presenting More Material Results in Less Understanding, ResearchGate [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/232530555_Cognitive_Constraints_on_Multimedia_Learning_When_Presenting_More_Material_Results_in_Less_Understanding [consulté le 14 décembre 2024].

²⁴ A Personalization Effect in Multimedia Learning: Students Learn Better When Words Are in Conversational Style Rather Than Formal Style, [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/232481296_A_Personalization_Effect_in_Multimedia_Learning_Students_Learn_Better_When_Words_Are_in_Conversational_Style_Rather_Than_Formal_Style [consulté le 15 décembre 2024].

derrière ce principe est que les matériels spatialement contigus facilitent l'intégration des informations verbales et visuelles, réduisant la charge cognitive associée à la localisation des informations pertinentes. Des études ont indiqué que les étudiants qui interagissent avec des matériels où le texte est placé près des images pertinentes obtiennent de meilleurs résultats aux évaluations que ceux qui rencontrent des présentations disjointes²⁵.

Dans les applications de RA, cela signifie que les annotations virtuelles ou les explications doivent être alignées spatialement avec leurs objets correspondants du monde réel.

3.2.2 Principe de Contiguïté Temporelle

Ce principe postule que les apprenants bénéficient de la présentation simultanée des mots et des images plutôt que séquentielle. Il est fondé sur l'idée qu'une exposition simultanée permet aux apprenants de former plus efficacement des connexions entre les informations verbales et visuelles, améliorant ainsi la compréhension. La recherche a montré que les étudiants qui ont appris à partir de narrations animées avec du texte et des visuels simultanés ont obtenu des résultats significativement meilleurs aux tests de transfert que ceux qui ont reçu l'information dans un format séquentiel, comme les mots suivis de visuels ou vice versa.²⁶

Dans les contextes de RA, ce principe suggère que les superpositions devraient apparaître en synchronisation avec les événements ou objets pertinents du monde réel.

3.2.3 Principe de Signalisation

Le principe de signalisation souligne l'importance des indices qui mettent en évidence l'organisation de l'information. En fournissant des signaux visuels ou auditifs, les éducateurs peuvent guider l'attention des apprenants vers les éléments critiques du matériel, facilitant ainsi une meilleure compréhension et rétention. La RA peut mettre en œuvre cela à travers des surlignages visuels, des flèches ou d'autres mécanismes dirigeant l'attention qui guident les apprenants vers les caractéristiques importantes.

3.2.4 Principe de Redondance

Ce principe suggère que présenter des informations identiques dans plusieurs formats (par exemple, narration parlée et texte à l'écran) peut entraver l'apprentissage en surchargeant les ressources cognitives et en diminuant les résultats. La recherche de Mayer et Johnson sur la révision du principe de redondance souligne que la

²⁵ Principles for Reducing Extraneous Processing in Multimedia Learning, ResearchGate [en ligne]. Disponible à l'adresse :

https://www.researchgate.net/publication/359588527_Principles_for_Reducing_Extraneous_Processing_in_Multimedia_Learning [consulté le 16 décembre 2024].

²⁶ Ibid.

narration et le texte identiques peuvent entraîner une surcharge cognitive et une rétention réduite²⁷. Par conséquent, il est essentiel de concevoir soigneusement les présentations pour éviter les informations redondantes qui n'améliorent pas l'expérience d'apprentissage.

3.2.5 Principe de segmentation

Le principe de segmentation postule que les apprenants bénéficient d'informations présentées en segments gérables plutôt qu'en flux continu. Il s'aligne avec l'hypothèse de capacité limitée de la mémoire de travail. En termes simples, il suggère que la décomposition de l'information en parties plus petites et digestibles peut améliorer la compréhension et la rétention. Les applications de RA peuvent mettre cela en œuvre en présentant l'information par étapes ou en permettant aux apprenants de contrôler le rythme de présentation des informations.

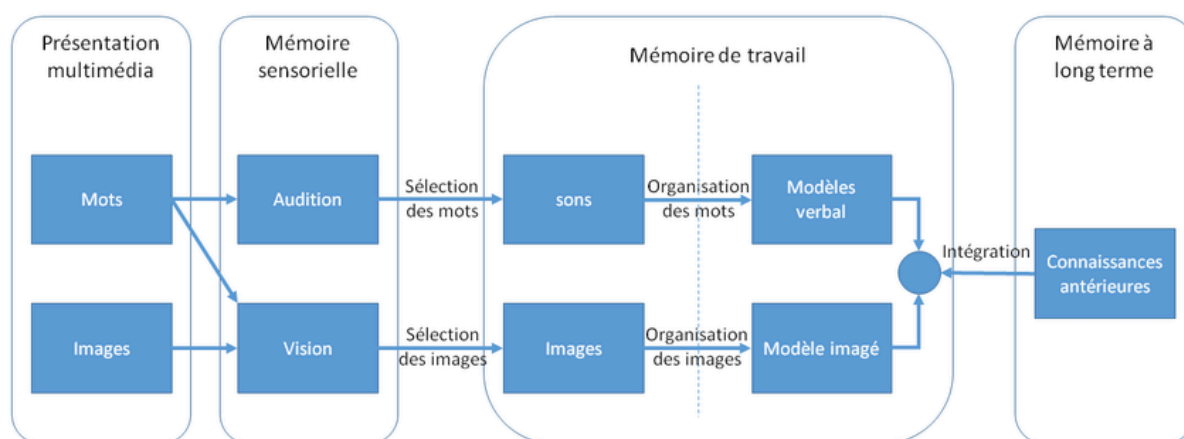


Figure 2: Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia selon Mayer (2014)²⁸

²⁷ MAYER, Richard E. et JOHNSON, Cheryl I., 2008. Revising the redundancy principle in multimedia learning. Journal of Educational Psychology. Vol. 100, no 2, pp. 380-386. DOI [10.1037/0022-0663.100.2.380](https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.2.380).

²⁸ Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia selon Mayer (2014) | Download Scientific Diagram, [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/figure/Theorie-cognitive-de-lapprentissage-multimedia-selon-Mayer-2014_fig1_331158493 [consulté le 2 janvier 2025].

Chapitre IV: Problématique

De nombreuses études ont déjà largement étudié et démontré le potentiel de l'utilisation de la réalité augmentée (comme le démontre le tableau ci-dessous) dans la sphère éducative à travers une large gamme d'utilisations, indiquant que la RA peut améliorer les résultats d'apprentissage en améliorant l'engagement des étudiants, leur motivation et leur compréhension des concepts complexes en influençant les variables d'apprentissage telles que la réussite, les attitudes, l'attention et la motivation.

Pour mieux comprendre l'état actuel de la recherche sur la RA dans l'éducation et ses effets sur l'apprentissage, une revue systématique de la littérature récente a été effectuée. Une analyse approfondie des études publiées au cours des dix dernières années révèle un consensus émergent sur les avantages potentiels de la RA dans divers contextes éducatifs. Le tableau suivant présente une synthèse des études clés qui ont examiné l'impact de la RA sur l'apprentissage, mettant en évidence la diversité des méthodologies employées et des résultats obtenus :

Auteur/ Année	Methode	Échantillon	Résultats
Bacca et al. (2015) ²⁹	Méthode Mixte	Étudiants en Formation Professionnelle	L'application Paint-cAR a montré un impact positif sur la motivation des étudiants, particulièrement en termes d'attention, de pertinence, de confiance et de satisfaction. Amélioration de l'apprentissage des procédures de réparation de peinture.
Reinacher et al. (2023) ³⁰	Quantitative	40 essais par 4 professionnels médicaux	Le guidage par RA a atteint un taux de réussite de 82,5% contre 40% avec l'approche conventionnelle. Amélioration significative de la précision et réduction du temps de procédure.

²⁹ BACCA, Jorge et al., 2015. Mobile Augmented Reality in Vocational Education and Training. Procedia Computer Science. Vol. 75, pp. 49-58. DOI [10.1016/j.procs.2015.12.203](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.203).

³⁰ REINACHER, Peter Christoph et al., 2023. Usage of augmented reality for interventional neuraxial procedures: A phantom-based study. European Journal of Anaesthesiology | EJA. Vol. 40, no 2, p. 121. DOI [10.1097/EJA.0000000000001755](https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000001755).

Cercenelli et al. (2022) ³¹	Méthode mixte	62 étudiants en médecine	Les étudiants ont évalué la RA comme une expérience agréable, montrant de l'enthousiasme à la tester, la trouvant excitante et plus précieuse et engageante par rapport à l'étude des manuels
Stone et al. (2023) ³²	Méthode Mixte	7 enseignants et 110 étudiants	La plateforme de formation à distance en RA a permis un apprentissage efficace des procédures à distance. 70,9% des participants ont demandé plus de formation en RA.
Kim & Shim (2022) ³³	Méthode mixte	88 étudiants	Les résultats ont montré une réussite académique immédiate significative et une rétention du contenu. Les technologies immersives améliorent l'apprentissage des étudiants indépendamment de leurs besoins éducatifs spéciaux
Badilla-Quintana et al. (2020) ³⁴	Quantitative	60 étudiants	Impact positif sur l'apprentissage des étudiants à court et long terme. Approche intéressante utile et motivante en classe

³¹ AEducaAR, Anatomical Education in Augmented Reality: A Pilot Experience of an Innovative Educational Tool Combining AR Technology and 3D Printing, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/3/1024> [consulté le 3 décembre 2024].

³² STONE, Nelson N. et al., 2022. Remote surgical education using synthetic models combined with an augmented reality headset. *Surgery Open Science*. Vol. 10, pp. 27-33. DOI [10.1016/j.sopen.2022.06.004](https://doi.org/10.1016/j.sopen.2022.06.004).

³³ KIM, Jeongah et SHIM, Jaekwoun, 2022. Development of an AR-Based AI Education App for Non-Majors. *IEEE Access*. Vol. 10, pp. 14149-14156. DOI [10.1109/ACCESS.2022.3145355](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145355).

³⁴ BADILLA-QUINTANA, María Graciela, SEPULVEDA-VALENZUELA, Eileen et SALAZAR ARIAS, Margarita, 2020. Augmented Reality as a Sustainable Technology to Improve Academic Achievement in Students with and without Special Educational Needs. *Sustainability*. Vol. 12, no 19, p. 8116. DOI [10.3390/su12198116](https://doi.org/10.3390/su12198116).

Akçayır et al. (2017) ³⁵	Méthode mixte	76 étudiants	Les résultats expérimentaux ont révélé que la technologie RA a significativement amélioré le développement des compétences de laboratoire des étudiants universitaires et les a aidés à développer des attitudes positives envers les laboratoires de physique
Gecu-Parmaksız & Delialioğlu (2019) ³⁶	Méthode mixte	72 étudiants préscolaires	Les manipulations virtuelles affectent l'amélioration de la compréhension des formes géométriques chez les enfants d'âge préscolaire, ce qui s'avère être un outil efficace pour soutenir le processus d'apprentissage
Low et al. (2022) ³⁷	Méthode mixte	50 étudiants	La technologie RA en éducation offre une expérience d'apprentissage plus complète, améliore la motivation des étudiants, améliore les résultats d'apprentissage et favorise l'apprentissage tout au long de la vie
Cevahir et al. (2022) ³⁸	Méthode mixte	94 étudiants	Les exemples de travail d'animation en réalité augmentée (ARAW) transfèrent efficacement l'information à la mémoire à long terme, facilitant le processus cognitif intensif des étudiants et la résolution de problèmes complexes

³⁵ AKÇAYIR, Murat et al., 2016. Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories. Computers in Human Behavior. Vol. 57, pp. 334-342. DOI [10.1016/j.chb.2015.12.054](https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.12.054).

³⁶ GECU-PARMAKSIZ, Zeynep et DELIALIOĞLU, Omer, 2019. Augmented reality-based virtual manipulatives versus physical manipulatives for teaching geometric shapes to preschool children. British Journal of Educational Technology. Vol. 50, no 6, pp. 3376-3390. DOI [10.1111/bjet.12740](https://doi.org/10.1111/bjet.12740).

³⁷ LOW, Darren Yi Sern, POH, Phaik Eong et TANG, Siah Ying, 2022. Assessing the impact of augmented reality application on students' learning motivation in chemical engineering. Education for Chemical Engineers. Vol. 39, pp. 31-43. DOI [10.1016/j.ece.2022.02.004](https://doi.org/10.1016/j.ece.2022.02.004).

³⁸ CEVAHIR, Hakan, ÖZDEMİR, Muzaffer et BATURAY, Meltem Huri, 2022. The Effect of Animation-Based Worked Examples Supported with Augmented Reality on the Academic Achievement, Attitude and Motivation of Students towards Learning Programming. Participatory Educational Research. Vol. 9, no 3, pp. 226-247. DOI [10.17275/per.22.63.9.3](https://doi.org/10.17275/per.22.63.9.3).

Allcoat et al. (2021) ³⁹	Quantitative	75 participants	Il y a un avantage émotionnel à l'apprentissage en RA et RV, qui ont obtenu des résultats significativement meilleurs que l'apprentissage traditionnel en termes d'engagement
Baxter & Hainey (2019) ⁴⁰	Méthode mixte	100 étudiants	Les résultats prédominants ont indiqué que la plupart des étudiants considéraient l'utilisation de la RV comme ayant des implications pédagogiques fonctionnelles, améliorant leur expérience d'apprentissage et leur auto-efficacité
Alalwan et al. (2020) ⁴¹	Qualitative	29 enseignants	Plusieurs défis affectent la volonté des enseignants d'utiliser correctement la RA. La disponibilité et la vitesse d'Internet sont les principales préoccupations. Le matériel pédagogique limité et le soutien parental font partie des défis mentionnés
Orus et al. (2021) ⁴²	Méthode mixte	206 étudiants	Les résultats montrent que le contenu avec des vidéos réelles (360 degrés) influence positivement les perceptions de présence, la facilité d'imagination, l'attrait visuel et les intentions de réservation

³⁹ Education in the Digital Age: Learning Experience in Virtual and Mixed Realities - Devon Allcoat, Tim Hatchard, Freeha Azmat, Kim Stansfield, Derrick Watson, Adrian von Mühlénen, 2021, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0735633120985120> [consulté le 07 janvier 2025].

⁴⁰ (PDF) Student perceptions of virtual reality use in higher education, [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/332232459_Student_perceptions_of_virtual_reality_use_in_higher_education [consulté le 13 décembre 2024].

⁴¹ ALALWAN, Nasser et al., 2020. Challenges and Prospects of Virtual Reality and Augmented Reality Utilization among Primary School Teachers: A Developing Country Perspective. Studies in Educational Evaluation. Vol. 66, p. 100876. DOI [10.1016/j.stueduc.2020.100876](https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2020.100876).

⁴² ORÚS, Carlos, IBÁÑEZ-SÁNCHEZ, Sergio et FLAVIÁN, Carlos, 2021. Enhancing the customer experience with virtual and augmented reality: The impact of content and device type. International Journal of Hospitality Management. Vol. 98, p. 103019. DOI [10.1016/j.ijhm.2021.103019](https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2021.103019).

Haile & Kang (2020) ⁴³	Méthode mixte	179 participants	L'interactivité en temps réel et le divertissement de l'application MAR augmentent respectivement la cognition et l'affection, tandis que l'irritation avec l'application MAR diminue l'affection
Lin et al. (2020) ⁴⁴	Méthode mixte	52 étudiants	L'efficacité de l'apprentissage, l'émotion et l'expérience de flux se sont améliorées et ont été significativement affectées par l'intégration de la RA dans le jeu de plateau d'éducation à la santé

Tableau 1: Synthèse des études récentes sur l'utilisation de la RA dans l'éducation

De plus, la versatilité de la RA s'étend à diverses disciplines éducatives, notamment les sciences naturelles. Une récente revue de littérature menée par Lampropoulos a examiné 63 études, concluant que la RA sert d'outil précieux pour l'enseignement de matières comme la biologie, la chimie et la physique, améliorant les expériences d'enseignement et d'apprentissage pour les élèves de maternelle et d'école primaire, indiquant que "Les étudiants, les enseignants et les parents ont exprimé des attitudes et des émotions positives concernant l'utilisation de la réalité augmentée dans l'éducation. Les étudiants qui ont appris à travers les applications de réalité augmentée ont obtenu de meilleurs résultats d'apprentissage que ceux qui ont appris par des moyens et méthodes traditionnels."⁴⁵

Cependant, bien que l'exploration des technologies de RA dans les contextes éducatifs ait suscité une attention significative, il demeure une lacune notable dans les études qui mesurent et comprennent efficacement les impacts cognitifs de ces technologies sur l'apprentissage pour les élèves du primaire. En utilisant Google Scholar, nous avons trouvé que **472 000** articles abordaient la réalité augmentée et l'éducation, **17 600** examinaient la réalité augmentée et l'impact/charge cognitive, et **18 800** se concentraient sur l'impact/charge cognitive et l'éducation. Aussi, **17 000** études semblaient intégrer les trois dimensions - réalité augmentée, impact cognitif et éducation. Cependant, lorsque nous essayons de restreindre cela et de nous concentrer spécifiquement sur un sujet particulier comme la photosynthèse, ce nombre chute rapidement à **173** résultats.

⁴³ HAILE, Tegegne Tesfaye et KANG, Mincheol, 2020. Mobile Augmented Reality in Electronic Commerce: Investigating User Perception and Purchase Intent Amongst Educated Young Adults. *Sustainability*. Vol. 12, no 21, p. 9185. DOI [10.3390/su12219185](https://doi.org/10.3390/su12219185).

⁴⁴ Effects of Incorporating AR into a Board Game on Learning Outcomes and Emotions in Health Education, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/11/1752> [consulté le 24 décembre 2025].

⁴⁵ LAMPROPOULOS, Georgios, 2024. Teaching and learning natural sciences using augmented reality in preschool and primary education: A literature review. *Advances in Mobile Learning Educational Research*. Vol. 4, no 1, pp. 1021-1037. DOI [10.25082/AMLER.2024.01.013](https://doi.org/10.25082/AMLER.2024.01.013).

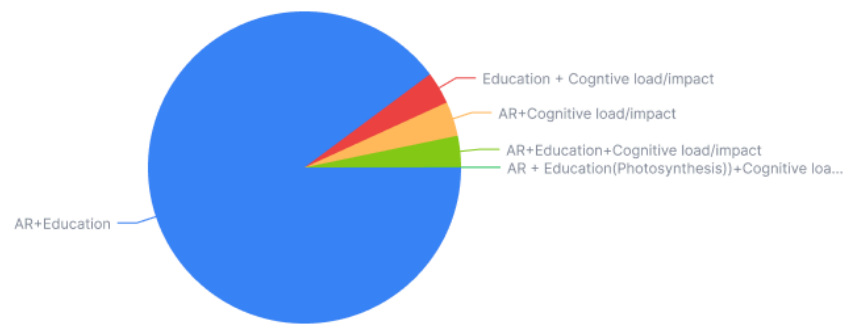


Figure 3 : Distribution des publications scientifiques liées à la réalité augmentée dans l'éducation et la charge cognitive sur Google Scholar

Dans le but de combler la pénurie prononcée dans la littérature actuelle, cette étude a pour objectif d'examiner l'influence de la réalité augmentée sur la charge cognitive lors de l'enseignement de la photosynthèse. Cette démarche est d'un grand intérêt étant donné que la photosynthèse est un processus biologique complexe qui incite les étudiants à appréhender simultanément plusieurs concepts abstraits - des interactions moléculaires jusqu'aux processus cellulaires, sans oublier les conséquences écologiques de plus grande envergure. Si la réalité augmentée a prouvé son utilité dans le domaine de l'enseignement scientifique en général, son influence précise sur la charge cognitive lors de l'apprentissage du processus de photosynthèse est peu explorée, comme le montre le nombre restreint d'études traitant de cette intersection spécifique.

En plus, la plupart des recherches sur la RA en contexte éducatif ont été axées sur l'évaluation des résultats d'apprentissage ou d'un engagement des étudiants, plutôt que sur une mesure directe de la charge cognitive subie ou même l'aspect longitudinal. Ce manque de focalisation sur la dimension cognitive renforce la nécessité de mener des études ciblées sur cet aspect précis.

Le choix de la photosynthèse comme sujet d'étude est stratégique pour plusieurs raisons :

- Grâce à sa complexité à plusieurs niveaux, elle se présente comme un candidat parfait pour examiner la gestion de la charge cognitive via des visualisations interactives en RA. Elle offre la possibilité de démontrer simultanément divers échelons (moléculaire, cellulaire, écosystémique) d'un même phénomène.
- Il s'agit d'un concept fondamental reliant divers domaines de la biologie, ce qui renforce l'importance de son apprentissage et justifie l'intérêt d'y intégrer des outils pédagogiques innovants comme la RA.

- Les enseignements tirés de cette étude pourraient éclairer l'intégration de la RA dans l'enseignement d'autres processus biologiques complexes, en fournissant un cadre et des stratégies adaptables à des thématiques similaires.
- Le faible nombre d'études préalables sur la RA appliquée à la photosynthèse offre une opportunité de contribution significative, tant au développement de la technologie éducative en RA qu'à l'amélioration des pratiques d'enseignement en biologie.

D'où la question de recherche principale suivante :

Comment l'usage de la réalité augmentée, en fonction du type de support pédagogique (texte ou vidéo), influence-t-il les différentes formes de charge cognitive ainsi que la performance d'apprentissage immédiate et différée ?

Hypothèse 1

L'utilisation de la RA lors de l'apprentissage améliorera la performance immédiate des apprenants par rapport à un support classique (texte ou vidéo seul). En d'autres termes, juste après la phase d'apprentissage, les participants ayant bénéficié de la RA auront de meilleurs résultats par rapport aux participants ayant étudié avec un support purement textuel ou vidéo. Cette attente se base sur le principe du double codage et de la multimodalité de Mayer. De plus, la RA, réduisant la charge cognitive extrinsèque en intégrant l'information directement dans le contexte d'apprentissage, on prévoit un gain de performance immédiate pour ce groupe.

Hypothèse 2

L'utilisation de la réalité augmentée pour l'apprentissage favorisera une consolidation plus durable des connaissances par rapport aux supports textuels ou vidéo seuls. Nous présumons que les participants en groupes de RA retiendront plus d'informations après une certaine période, étant donné que l'encodage visuel et verbal plus élaboré (double codage) et une interaction plus intense avec le contenu devraient générer une empreinte de mémoire plus robuste. Ceci est cohérent avec les théories cognitives de l'apprentissage, qui indiquent qu'un matériau appris de manière multimodale et contextualisée est retenu plus durablement par la mémoire à long terme.

Hypothèse 3

Les apprenants utilisant un support en RA reporteront une charge cognitive perçue plus faible que ceux apprenant via un texte ou une vidéo seuls. La RA étant conçue pour diminuer la charge cognitive extrinsèque (en évitant aux apprenants de jongler entre plusieurs sources d'information et en fournissant des indications précisément là où elles sont nécessaires), nous anticipons que les participants en RA se sentiront moins surchargés mentalement. L'insertion spatiale des informations dans l'environnement (principe de contiguïté) est spécifiquement destinée à supprimer

l'effet de la division de l'attention, ce qui devrait réduire le fardeau cognitif lors de l'exécution de la tâche. À l'inverse, un support texte ou vidéo qui n'est pas interactif peut nécessiter un effort supplémentaire pour assimiler et conserver l'information, particulièrement si l'apprenant doit établir une connexion entre le contenu et sa représentation mentale.

Hypothèse 4

Nous ne prévoyons qu'une interaction entre le type de contenu initial (texte ou vidéo) et l'usage de la RA sur les performances et la charge cognitive. Autrement dit, l'efficacité de la réalité augmentée pourrait dépendre du support avec lequel elle est liée. Par exemple, il est possible que la RA apporte un bénéfice plus marqué en complément d'un support texte qu'en complément d'une vidéo. En effet, un texte seul ne fournit pas de visuels dynamiques, et la RA pourrait compenser ce manque en offrant des illustrations en contexte. À l'inverse, une vidéo propose déjà des images animées ; l'ajout de RA dans ce cas pourrait avoir un effet additionnel moindre. Ainsi, nous postulons que l'avantage de la RA sera d'autant plus grand lorsque le support de base est moins riche visuellement (texte), ce qui se traduirait par une interaction observable entre ces facteurs dans nos résultats.

Chapitre V:

Méthodologie

La photosynthèse, un processus biologique complexe impliquant des concepts à la fois macroscopiques (rôle des feuilles, échange de gaz) et microscopiques (réactions chimiques dans les chloroplastes). Elle a été retenue comme thème car elle représente un contenu multidimensionnel propice à évaluer l'apport de la RA : la photosynthèse comporte des aspects visuels et dynamiques (cycles biochimiques, structures cellulaires) souvent difficiles à appréhender par le texte seul, ce qui en fait un candidat idéal pour tester la visualisation en RA. L'objectif pédagogique, commun à tous les groupes, était d'acquérir une compréhension des étapes de la photosynthèse (réactions lumineuses et cycle de Calvin), des éléments impliqués (CO_2 , H_2O , O_2 , glucose..etc) et des conditions influençant le processus (lumière, ouverture des stomates..etc), ainsi que de pouvoir retenir ces informations au-delà de la session d'apprentissage immédiate.

5.1. Participants

L'étude a mobilisé 20 participants ($N=20$), répartis équitablement entre les quatre groupes soit $n=5$ par condition. Les participants étaient de jeunes adultes, étudiants de niveau universitaire et lycée ainsi que non étudiant

Les volontaires ont été recrutés dans les rues et universités de Poitiers où environ 120 personnes ont été approchées individuellement afin de leur présenter le projet de fin d'études, Il leur était précisé que la participation prendrait environ 30 minutes et inclurait un petit test à la fin de l'expérimentation, ainsi qu'un test de suivi un mois plus tard, toutes ces informations ont été recueillies via le biais d'un formulaire en ligne (voir Annexe A). Ce formulaire présentait brièvement l'étude, les critères de participation (être étudiant, avoir au moins 17 ans, niveau d'anglais, et recueillait le consentement éclairé.

L'âge moyen des participants confirmés était de 21,8 ans ($\pm 2,3$ ans), avec un équilibre hommes/femmes. Aucun participant n'avait de connaissance préalable approfondie sur la photosynthèse au-delà du niveau scolaire de base. Par ailleurs, tous disposaient d'un équipement leur permettant de suivre l'étude en ligne ordinateur avec connexion internet pour la visioconférence et, pour les groupes RA, un smartphone iOS leurs était demandé. Un consentement éclairé a été obtenu, en informant les volontaires des objectifs généraux (éducation et technologies) sans dévoiler les hypothèses spécifiques liées à la RA afin d'éviter les biais d'anticipation.

5.2. Design expérimental et groupes

Pour examiner l'impact de la réalité augmentée sur la charge cognitive et l'apprentissage, une expérimentation contrôlée a été menée selon un plan factoriel 2x2 à groupes indépendants. Deux facteurs ont été étudiés :

1. Le mode de diffusion du contenu (support textuel vs support vidéo)
2. La présence de RA (absence vs présence d'une application de RA).

Ceci a abouti à quatre groupes expérimentaux distincts, répartissant les participants de façon aléatoire dans les conditions suivantes :

- **Groupe 1 – Texte seul** : apprentissage à partir d'un document textuel (sans éléments multimédias interactifs).
- **Groupe 2 – Vidéo seule** : apprentissage à partir d'une vidéo pédagogique.
- **Groupe 3 – Texte + RA** : apprentissage à partir du même texte que le groupe 1, avec en complément l'utilisation d'une application mobile de RA (McGraw-Hill AR).
- **Groupe 4 – Vidéo + RA** : apprentissage à partir de la même vidéo que le groupe 2, avec en complément l'utilisation de l'application de RA.

Sur le plan expérimental chaque participant n'expérimente qu'une condition (intersujets) et vise à comparer les performances d'apprentissage et la charge cognitive perçue entre ces groupes. Les variables dépendantes principales sont le score de compréhension immédiate (QCM) et le score de rétention (score à au même test de rappel un mois plus tard), ainsi que la charge cognitive subjective mesurée juste après la phase d'apprentissage. Une randomisation a été admise dans les groupes pour but d'équilibrer les caractéristiques des participants entre conditions et de contrôler les variables confondantes (niveau de connaissance initial, aisance avec les technologies, etc.). Le devis garantit ainsi que toute différence entre groupes pourra être attribuée au mode d'apprentissage plutôt qu'à des différences préexistantes entre participants.

5.3. Matériel pédagogique et technologie RA

L'objectif pédagogique, commun à tous les groupes, était d'acquérir une compréhension des étapes de la photosynthèse (réactions lumineuses et cycle de Calvin), des éléments impliqués (CO_2 , H_2O , O_2 , glucose, pigments chlorophylliens) et des conditions influençant le processus (lumière, ouverture des stomates, etc.), ainsi que de pouvoir retenir ces informations au-delà de la session d'apprentissage immédiate.

Chaque condition utilisait un support différent ou combinaison de supports pour transmettre le même ensemble de notions afin que la base d'information soit équivalente entre groupes. Le contenu a été adapté d'une source unique (chapitre d'un manuel⁴⁶) pour

46

https://info.mheducation.com/rs/128-SJW-347/images/201602_Mader_Student%20Edition_Chapter%208.pdf

garantir l'uniformité des faits et concepts couverts, seuls le médium et l'enrichissement RA variant entre conditions.

5.3.1 Support texte

Un document écrit d'environ 3 pages sur Notion (voir Annexe B) a été remis aux groupes 1 et 3. Rédigé en anglais, il décrit de façon structurée la photosynthèse (Organisation de la feuille, réaction photochimique dans les thylakoïdes, etc.). Ce document comprenait également quelques schémas statiques légendés (schéma d'une feuille et d'un chloroplaste) mais aucune composante interactive ou multimédia. Son contenu textuel correspond en termes d'informations à la narration de la vidéo pédagogique utilisée dans l'autre condition, afin d'assurer une équivalence sémantique des deux supports (mêmes faits et explications abordés). Le texte permet une lecture auto-rythmée par l'apprenant, ce qui est un avantage du support écrit.

5.3.2 Support vidéo

Le contenu vidéo provenait de la série éducative Amoeba Sisters⁴⁷ d'une durée de 7 minutes 47 secondes, qui explique la photosynthèse à l'aide de dessins animés et de narrations simplifiées. Cette vidéo combine un canal verbal (commentaire audio) et un canal visuel (animations didactiques), conformément aux principes du double codage de Paivio⁴⁸ et du multimédia de Mayer⁴⁹ qui soulignent l'importance de mobiliser les deux canaux de traitement (texte/son et image) pour améliorer la compréhension. En rendant le contenu plus concret visuellement, on s'attend à une meilleure compréhension qu'avec le texte seul, toutes choses égales par ailleurs. Les participants peuvent faire pause ou revenir en arrière si ils le souhaitent mais on été notifié qu'ils auront un maximum de 15 minutes pour visionner et prendre des notes sur papier pendant le visionnage si ils le souhaitent.

5.3.3 Application de Réalité Augmentée

L'application McGraw-Hill AR⁵⁰ disponible gratuitement sur smartphones/tablettes en anglais également a été utilisée dans les groupes RA. Elle propose des expériences en RA sur des sujets scientifiques, dont un module dédié entièrement à la photosynthèse. Concrètement, l'application fait apparaître, via la caméra du dispositif mobile, des modèles 3D interactifs, par exemple une feuille en coupe avec ses cellules chlorophylliennes, les molécules impliquées directement superposés à l'environnement réel comme le démontre la figure 4 ci-dessous. Les

⁴⁷ AMOEBA SISTERS, 2021. *Photosynthesis (UPDATED)* [en ligne]. 14 juillet 2021. Disponible à l'adresse : <https://www.youtube.com/watch?v=CMiPYHNNg28> [consulté le 19 mars 2025].

⁴⁸ Dual-coding theory, 2024Wikipedia [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dual-coding_theory&oldid=1254899468 [consulté le 13 décembre 2024]. Page Version ID: 1254899468

⁴⁹ MAYER, Richard E., 2024. The Past, Present, and Future of the Cognitive Theory of Multimedia Learning. *Educational Psychology Review*. Vol. 36, no 1, p. 8. DOI [10.1007/s10648-023-09842-1](https://doi.org/10.1007/s10648-023-09842-1).

⁵⁰ <https://apps.apple.com/us/app/mcgraw-hill-ar/id1620378347>

utilisateurs peuvent faire tourner, agrandir ou réduire ces modèles et déclencher des animations illustrant les étapes de la photosynthèse.

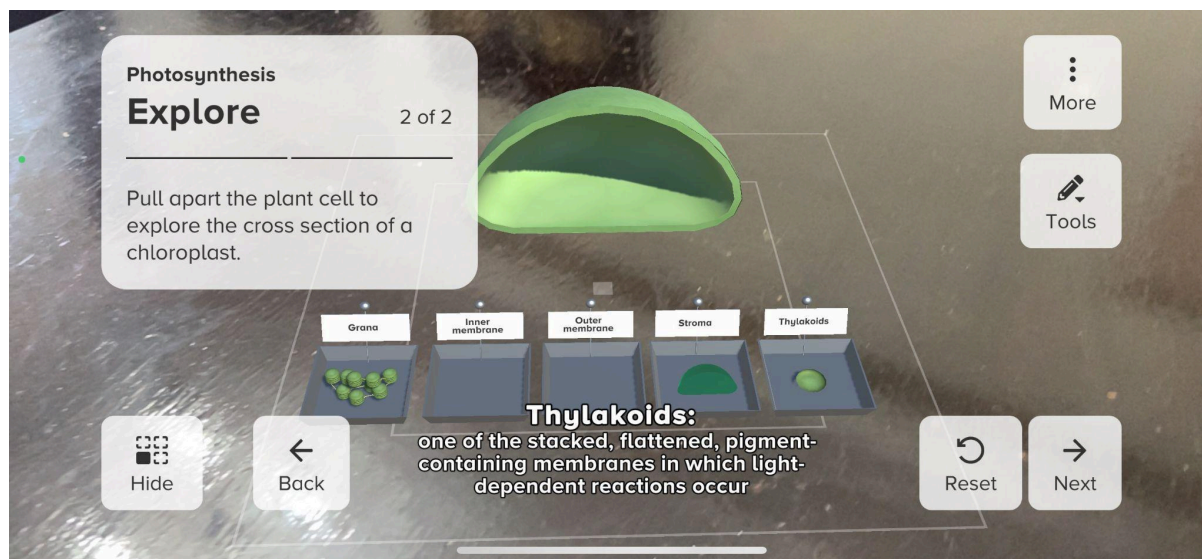


Figure 4 : Interface de l'application McGraw-Hill AR montrant un modèle 3D de chloroplaste en coupe, avec identification des structures internes telles que les thylakoïdes et les membranes.

La raison pour laquelle cette application a été choisie est parce que l'institution McGraw Hill disposait déjà des ressources associées, telles que des textes (qui a été utilisé pour les groupe 1 et 3) et un test final, ce qui permettait de s'assurer que les mêmes informations étaient transmises de manière cohérente à travers tous les formats. De plus, il s'agissait d'une alternative gratuite, contrairement à d'autres applications.

5.4. Instruments de mesure

Plusieurs instruments quantitatifs ont été utilisés pour mesurer les variables dépendantes principales de l'étude :

- **5.4.1. Questionnaire à choix multiples de connaissances (QCM) :**

Conçu spécifiquement pour cette étude, il comportait 16 questions à choix multiples sur la photosynthèse. Chaque bonne réponse rapportait 1 point (score maximum = 16). Ce QCM (voir ANNEXE D) a été employé à deux reprises (test immédiat et test de rétention). Les questions portaient sur la définition de la photosynthèse, les réactifs et produits de la réaction, les rôles de la chlorophylle...etc. Parmi celles-ci figurait notamment une question à caractère visuel (évaluée sur 5 points) où les participants devaient analyser un diagramme ou schéma lié à la photosynthèse. Cette question visuelle permet de tester la compréhension des relations spatiales ou des processus, et l'on s'attendait à ce que les supports riches en visuels

(vidéo ou RA) favorisent de meilleures performances sur celle-ci, conformément aux principes de l'apprentissage multimédia. Le QCM a été pris du site de McGraw Hill éducation pour s'assurer de sa pertinence par rapport au contenu enseigné et les dispositifs mis à dispositions des participants.

- **Échelle NASA-TLX :**

Afin de mesurer la charge cognitive des participants, nous avons eu recours au NASA Task Load Index (NASA-TLX) qui s'agit d'un questionnaire d'auto-évaluation en 6 dimensions (charge mentale, charge physique, charge temporelle, performance accomplie, effort et frustration). Les participants marquaient leur ressenti sur chaque échelle en repensant à la tâche d'apprentissage qu'ils venaient de réaliser. Dans notre analyse, nous avons calculé pour chaque individu un score global de charge cognitive sur 100 en faisant la moyenne des six composantes à l'aide d'un site en ligne⁵¹ après la phase d'évaluation. Un score élevé indique une charge cognitive globale importante ressentie pendant la tâche.

5.5. Déroulement des sessions

Chaque participant a pris part individuellement à une session en visioconférence (Google Meet) d'une durée totale de 30 minutes. La session était animée et suivait le déroulement standardisé suivant :

- 1. Accueil et instructions (3-5 minutes)** – Présentation brève de la session, rappel des consignes (par exemple : rester concentré, prévenir en cas de problème technique, mentionner la possibilité de prendre des notes mais préciser qu'elles ne pourront pas être utilisées pendant le test) et explication du déroulement, sans toutefois dévoiler l'hypothèse concernant la réalité augmentée (RA). Si le participant faisait partie des groupes 3 ou 4, une démonstration brève de l'installation de l'application était effectuée, et l'on s'assurait de son bon fonctionnement.
- 2. Phase d'apprentissage (15 minutes)** – Le participant effectuait la tâche d'apprentissage selon son groupe : lecture du texte ou visionnage de la vidéo, avec ou sans utilisation de l'application RA correspondante. La durée de cette phase était contrôlée (~15 minutes). Dans les groupes RA, les participants ont été encouragés à explorer le modèle AR (manipulations libres) pendant la phase d'apprentissage, en plus de lire ou regarder le support principal. J'étais présent dans l'appel pour chronométrer et en soutien technique si nécessaire, mais n'intervenait pas sur le contenu.
 - a. Consignes Groupe Texte:** Lire attentivement le texte du début à la fin. Le participant peut gérer son temps de lecture comme il le souhaite durant les 15 minutes (relire des passages, prendre des notes). Il ne dispose d'aucune

⁵¹ NASA TLX Calculator, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://nasa-tlx-calculator.vercel.app/> [consulté le 20 mai 2025].

illustration interactive ni audio, seulement du contenu écrit équivalent à celui de la vidéo (même notions clés abordées).

- b. **Consignes Groupe Video:** Regarder la vidéo dans son intégralité sans interruption. Le participant peut mettre en pause revoir la vidéo, afin de reproduire une expérience d'apprentissage continue similaire aux autres groupes. (Et aussi parce que la vidéo dure environ 8 minutes, et les autres participants auront 15 minutes).
- c. **Groupes Text/Video + RA:** En plus de l'une des deux autres consignes, il est précisé aux participants qu'ils peuvent utiliser le dispositif à n'importe quel moment durant les 15 minutes (que ce soit avant le texte/la vidéo, pendant ou après).

À l'approche de la fin de la phase d'apprentissage, les participants sont informés du temps restant.

3. Évaluation immédiate des connaissances – QCM (10 minutes) – Juste après l'apprentissage, les participants ont complété un questionnaire à choix multiples individuel portant sur la photosynthèse. Comme mentionnée au-dessus le QCM comprenait 16 questions à quatre options chacune, couvrant l'ensemble des notions clés vues pendant l'apprentissage. Ce test immédiat, noté sur 16 points, visait à mesurer la performance d'apprentissage immédiate (compréhension et mémorisation à court terme). Le questionnaire était administré via un formulaire en ligne (Google Forms) partagé via un lien dans le chat de Google Meet. Le temps de réponse était d'environ 10 minutes, suffisant étant donné le format QCM et la courte longueur du test. À l'approche de la fin de la phase d'évaluation, les participants sont informés du temps restant.

4. Mesure de la charge cognitive (≈3-5 min) – Immédiatement après le QCM, chaque participant a rempli l'échelle NASA-TLX (*Task Load Index*) pour obtenir un indice global de la charge de travail cognitive et mentale ressentie pendant la tâche d'apprentissage.

5. Test de rétention à distance – Afin d'évaluer la rétention des connaissances à long terme, le même QCM, a été administré un mois après la session initiale. Ce test de rétention s'est déroulé en ligne de manière asynchrone : le lien du QCM a été envoyé par email aux ~30e jour, et les participants avaient 48 h pour y répondre sans revoir le cours. Ils ont été instruits de compléter le test de mémoire sans aide extérieure. Le score à ce QCM de suivi fournit une mesure de l'apprentissage retenu après un délai significatif.

Tout au long des sessions, les conditions expérimentales ont été maintenues aussi constantes que possible en dehors des variables d'intérêt. Par exemple, On suivait un script pour donner des instructions identiques, et aucune aide sur le contenu de la photosynthèse n'a été apportée pendant l'apprentissage. Le format en visioconférence a été identique pour tous ; les différences tenaient uniquement au matériel pédagogique (texte/vidéo, avec/sans RA). Le recours au distanciel a permis de réaliser l'étude malgré les contraintes logistiques, mais il

implique que l'environnement d'apprentissage des participants n'était pas totalement contrôlé.

5.6. Analyse des données

Étant donné la taille modeste de l'échantillon (5 participants par groupe) et le fait que les distributions de scores pouvaient s'écarter de la normalité, nous avons privilégié une approche non paramétrique pour comparer les groupes. Plus précisément, les effets des conditions expérimentales sur les scores de QCM (immédiat et rétention) et sur la charge cognitive ont été examinés à l'aide du test de Kruskal-Wallis afin de déterminer s'il existait des différences significatives entre au moins un des quatre groupes, suivi d'un test de Dunn-Bonferroni pour savoir quels groupes montrent des disparités significatives, puisque l'analyse de Kruskal-Wallis ne démontre qu'une différence globale sans indiquer spécifiquement où elle se trouve. L'ajustement de Bonferroni sert à maîtriser le risque d'erreur de première espèce résultant des comparaisons multiples.

5.6.1 Définition du test de Kruskal-Wallis

Selon Wikipedia le test de Kruskal-Wallis (également appelé ANOVA unidirectionnelle sur les rangs) est un test statistique non paramétrique qui permet de comparer plusieurs groupes indépendants (généralement $k \geq 3$ groupes) afin de déterminer s'ils proviennent d'une même population au sens statistique⁵². Autrement dit, il vérifie la tendance centrale (médiane) de l'égalité entre ces groupes. L'hypothèse nulle (H_0) présuppose que tous les groupes partagent la même distribution (ce qui les amène à être considérés comme un seul échantillon combiné), pendant que l'hypothèse alternative (H_1) soutient qu'au moins un groupe provient d'une population différente (c'est-à-dire présente une médiane significativement différente).

En tant que méthode non paramétrique, le test de Kruskal-Wallis impose moins de conditions strictes que son équivalent paramétrique (ANOVA)⁵³. Ses principales conditions d'application sont les suivantes :

- **Indépendance des échantillons** : Les groupes à comparer doivent être composés d'observations indépendantes (chaque sujet appartient à un groupe et il participe une seule fois dans les données.) En cas de dépendance (mesures répétées sur les mêmes

⁵² Test de Kruskal-Wallis — Wikipédia, [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://fr.wikipedia.org/wiki/Test_de_Kruskal-Wallis [consulté le 20 mai 2025].

⁵³ EASILY, Learn Statistics, 2024. Analyse de variance de Kruskal-Wallis : comparaison de données non paramétriques. *LEARN STATISTICS EASILY* [en ligne]. 21 mars 2024. Disponible à l'adresse : <https://fr.statisticseasily.com/analyse-de-variance-de-Kruskal-Wallis/> [consulté le 20 mai 2025].

individus), le mieux serait d'utiliser un autre test non paramétrique.⁵⁴

- **Données au moins ordinales** : La variable d'intérêt doit pouvoir être ordonnée par rang (échelle ordinale minimum). Le test de Kruskal-Wallis n'exige pas de données quantitatives continues strictement, il fonctionne avec des rangs, ce qui le rend adapté aux échelles ordinales.
- **Aucune normalité requise** : Contrairement à l'ANOVA, il n'est pas nécessaire que les données de chaque groupe suivent une distribution normale. Le test de Kruskal-Wallis est donc indiqué lorsque l'hypothèse de normalité est violée ou incertaine.

Le test utilise les rangs des données plutôt que les valeurs brutes. La statistique de test calculée, notée H (parfois appelée statistique H), mesure l'écart entre la répartition effective des rangs par groupe et la répartition qu'on observerait si tous les groupes avaient la même distribution. Les étapes de calcul peuvent être résumées ainsi :

Classement des données: On regroupe l'ensemble des H observations de tous les groupes, puis on les classe par ordre croissant. On attribue un rang à chaque valeur (rang 1 pour la plus petite observation, rang N pour la plus grande etc..)

Sommes de rangs par groupe: pour chaque groupe i , on calcule R_i , la *somme des rangs* de toutes les observations appartenant à ce groupe. Si les groupes sont de taille n_i , on s'attend, sous H_0 , à ce que chaque somme de rangs R_i soit à peu près équivalente (puisque les rangs seraient distribués aléatoirement entre groupes en absence de différence).

Calcul de la statistique H : on calcule la statistique de test à l'aide de la formule suivante⁵⁵ :

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \sum_{i=1}^k \frac{R_i^2}{n_i} - 3(N+1)$$

Figure 5 : Formule du test de Kruskal-Wallis (statistique H)

⁵⁴ t-Test, khi-deux, ANOVA, Régression, Corrélation..., [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://datatab.fr/tutorial/kruskal-wallis-test> [consulté le 20 mai 2025].

⁵⁵ Test de Kruskal-Wallis, op. cit.

où les différents termes sont :

- N – le nombre total d’observations (tous groupes confondus)
- K – le nombre de groupes comparés
- n_i – l’effectif (taille) du groupe i
- R_i – la somme des rangs des observations du groupe i (calculée à l’étape 2)

Intuitivement, plus les rangs d’un groupe sont globalement élevés ou faibles par rapport aux autres, plus R_i s’écarte de la valeur attendue sous H_0 , et plus H augmentera. À l’inverse, si tous les groupes ont des rangs mêlés de façon homogène, les R_i seront proches et H restera faible.

Décision statistique: Une fois H calculé, on le compare à la distribution théorique appropriée (loi du *khi-deux*)⁵⁶ pour en évaluer la significativité statistique (voir section « Interprétation des résultats » ci-dessous). En pratique, on détermine la **p-value** du test associée à H (probabilité d’obtenir une valeur de H aussi extrême si l’hypothèse nulle est vraie), ce qui permet de statuer sur H_0 .

5.6.2. Pertinence du test dans cette étude

En ce qui concerne la pertinence du test dans notre étude, le choix se justifie par plusieurs considérations méthodologiques liées à la nature des données et à la taille de l’échantillon :

- **Taille d’échantillon réduite :** avec seulement 5 participants par groupe (soit $N = 20$ au total), il est difficile de satisfaire ou même de vérifier l’hypothèse de normalité des distributions. Des effectifs aussi faibles rendent les tests paramétriques classiques (tels que l’ANOVA) peu fiables, car la moindre déviation de la normalité peut biaiser les résultats. Le test de Kruskal-Wallis est alors plus approprié dans ce cas de figure, car il n’exige pas de distribution normale des données et demeure valide pour de petits échantillons.⁵⁷

⁵⁶ Le test du khi-deux, [en ligne]. Disponible à l’adresse : <https://www.jmp.com/fr/statistics-knowledge-portal/chi-square-test> [consulté le 28 mai 2025].

⁵⁷ EASILY, Learn Statistics, 2024. Analyse de variance de Kruskal-Wallis : comparaison de données non paramétriques. LEARN STATISTICS EASILY [en ligne]. 21 mars 2024. Disponible à l’adresse : <https://fr.statisticseasily.com/analyse-de-variance-de-Kruskal-Wallis/> [consulté le 20 mai 2025].

- **Nature ordinale des mesures:** Si la variable mesurée (dans notre exemple le niveau de charge cognitive) l'est au moyen d'échelles ordinales, l'utilisation d'un test non paramétrique est recommandée. Le test se base sur le classement des scores plutôt que sur les valeurs absolues, ce qui le rend tout indiqué pour traiter des données ordinales dont l'intervalle entre valeurs n'est pas nécessairement constant.⁵⁸
- **Robustesse et adéquation au contexte :** De manière générale, le test de Kruskal-Wallis est reconnu comme un outil de prédilection pour comparer plus de deux groupes indépendants lorsque les conditions d'application des tests paramétriques classiques (normalité, homoscedasticité) ne sont pas réunies⁵⁹. Dans notre étude – caractérisée par un petit échantillon et des données potentiellement non normales, le test offre donc une solution statistique plus fiable et plus prudente que l'ANOVA, en minimisant le risque de conclusions erronées dû à la violation des hypothèses paramétriques. (Notons que la condition d'indépendance des observations est par ailleurs respectée ici, chaque groupe étant composé de participants distincts sans recoupement, ce qui autorise l'utilisation du test dans de bonnes conditions).

5.6.3. Interprétation des résultats du test

Une fois la statistique H calculée pour les données observées, il faut déterminer si sa valeur indique une différence significative entre les groupes. Sous l'hypothèse nulle (H_0 : pas de différence entre groupes), la statistique H suit (approximativement) une distribution du χ^2 (chi-carré) avec $K - 1$ degrés de liberté. (Cette approximation est raisonnablement précise tant que chaque groupe comporte au moins ~5 observations, condition satisfaite dans notre étude.)⁶⁰

On utilise donc la loi χ^2_{k-1} pour calculer la p-value associée à la valeur de H obtenue. La p-value représente la probabilité d'observer une statistique H aussi grande (ou plus) si l'hypothèse nulle est vraie.

Décision statistique :

- On compare la p-value au seuil de significativité choisi (par exemple $\alpha = 0.05$, soit 5 %). Si la p-value est inférieure à α , on rejette l'hypothèse nulle – cela signifie que

⁵⁸ t-Test, khi-deux, ANOVA, Régression, Corrélation..., op. cit.

⁵⁹ EASILY, Learn Statistics, op. cit.

⁶⁰ Methods and formulas for Kruskal-Wallis Test, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://support.minitab.com/en-us/minitab/help-and-how-to/statistics/nonparametrics/how-to/kruskal-wallis-test/methods-and-formulas/methods-and-formulas/> [consulté le 23 mai 2025].

l'on a mis en évidence une différence statistiquement significative entre au moins deux des groupes comparés. Concrètement, cela indique qu'au moins un des groupes a une médiane différente des autres.

- Mais si la p-value est supérieure à α , on ne rejette pas l'hypothèse nulle, ce qui suggère qu'aucune différence significative n'a été détectée entre les groupes (les éventuelles variations observées pouvant être dues au hasard d'échantillonnage).

Dans notre cas, trois tests de Kruskal-Wallis séparés ont été menés : un pour le score du QCM immédiat, un pour le score du QCM à 1 mois, et un pour le score de charge cognitive (NASA-TLX global). Le seuil de signification statistique a été fixé à $p < 0,05$. En cas de résultat significatif, une interprétation des différences entre groupes a été réalisée en comparant les rangs moyens et les médianes de chaque groupe. L'analyse a été effectuée avec datatab.fr, ou les moyennes $\pm$ écarts-types par groupe ont également été calculées pour fournir une description claire des performances et de la charge cognitive. Les résultats sont présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre VI: Résultats

Dans ce chapitre, nous proposons tout d'abord de faire un état des lieux des résultats quantitatifs de notre expérience qui consistait à comparer les quatre groupes expérimentaux sur les mesures de performance (le score au QCM immédiatement après l'apprentissage, et le score de rétention un mois plus tard) ainsi que sur la charge cognitive. Les statistiques descriptives (moyennes et écarts-types) par groupe sont d'abord exposées, suivies des résultats des tests de Kruskal-Wallis évaluant l'effet global du facteur de groupe. Un tableau synthétique regroupant l'ensemble des résultats détaillés est disponible en Annexe E.

Les figures ci-dessous offrent une visualisation simplifiée des différences entre conditions et résument les valeurs numériques clés.

6.1. Performance d'apprentissage immédiate (QCM immédiat)

Juste après la phase d'apprentissage, les scores moyens au QCM (sur 16) diffèrent selon les conditions (voir Figure 6 ci-dessous). De manière générale, les groupes ayant bénéficié de la RA obtiennent de meilleures performances immédiates que leurs homologues sans RA. En particulier, le groupe Vidéo + RA affiche le score moyen le plus élevé, suivi du groupe Texte + RA, puis de Vidéo seul, tandis que le groupe Texte seul est à la traîne.

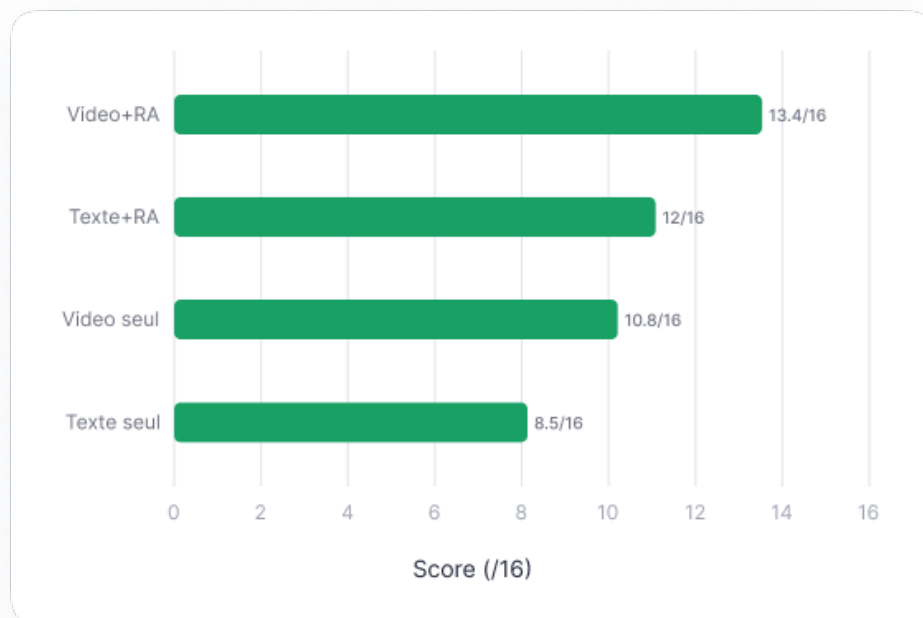


Figure 6 : Scores moyens au QCM immédiat (sur 16) par groupe

Les participants disposant d'aides visuelles dynamiques (vidéo et surtout RA) ont répondu correctement à un plus grand nombre de questions en moyenne. Le Tableau 2 quantifie ces résultats : on y observe que le groupe Texte seul obtient une moyenne d'environ $8,4 \pm 2,1$ (sur 16), nettement inférieure à celle du groupe Vidéo + RA ($\approx 13,4 \pm 1,3$). Les groupes Vidéo seul et Texte + RA présentent des moyennes intermédiaires (respectivement $\sim 10,8 \pm 1,5$ et $\sim 12,0 \pm 1,0$).

Les données suggèrent donc un effet bénéfique de la RA sur l'apprentissage immédiat, à support pédagogique équivalent, l'ajout de la RA améliore la performance (Texte + RA > Texte / Vidéo + RA > Vidéo). Par ailleurs, en comparant les modalités sans RA, le groupe vidéo surpasse le groupe texte, ce qui est cohérent avec les théories multimédias mentionnés par Mayer (un support vidéo combinant images et narration facilite la compréhension par double codage, d'où une meilleure performance immédiate qu'un texte seul).

Groupe	QCM immédiat (/16)	QCM rétention 1 mois (/16)	Charge cognitive (NASA-TLX /100)
Texte Seul	$8,4 \pm 2,1$	$6,6 \pm 2,1$	$70 \pm 10,2$
Vidéo seul	$10,8 \pm 1,5$	$8,4 \pm 1,7$	$60 \pm 11,8$
Texte + RA	$12,0 \pm 1,0$	$10,0 \pm 1,2$	$55 \pm 7,9$
Vidéo + RA	$13,4 \pm 1,3$	$11,4 \pm 1,3$	50 ± 9

Tableau 2 : Scores moyens au QCM immédiat et à 1 mois, et score du NASA-TLX.

Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis appliqué aux scores du QCM immédiat confirme qu'il existe une différence statistiquement significative entre les groupes ($H(3)=12.54$ / $p = 0.006$). Autrement dit, le type de support (texte/vidéo) et la présence ou non de RA ont un effet global sur la performance immédiate.

	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	p	Adj. p
Text only - Video only	-4.6	3.7	-1.24	.214	1
Text only - Text+AR	-8.5	3.7	-2.3	.022	.129
Text only - Video+AR	-12.5	3.7	-3.38	.001	.004
Video only - Text+AR	-3.9	3.7	-1.05	.292	1
Video only - Video+AR	-7.9	3.7	-2.14	.033	.196
Text+AR - Video+AR	-4	3.7	-1.08	.28	1

Tableau 3 : Scores Dunn-Bonferroni-Tests au QCM immédiat avec Adj.p étant les valeurs ajustées avec la correction de Bonferroni

Nous avons effectué un test post-hoc (*post hoc signifie "après cela", c'est-à-dire analyser les données expérimentales après coup*⁶¹) de Dunn avec correction de Bonferroni (Tableau 3) afin de comparer les groupes deux à deux (le test de Dunn est un test non paramétrique sur les rangs, utilisé suite à un Kruskal-Wallis significatif, qui ajuste les p pour comparaisons multiples via la correction de Bonferroni). Il en ressort que la différence de score au QCM immédiat entre le groupe Texte seul et le groupe Vidéo + RA est statistiquement significative (p ajusté = 0,005), ce qui indique que l'ajout de la RA à un support vidéo améliore nettement la performance immédiate par rapport à un apprentissage strictement textuel. En revanche, aucune autre comparaison par paire n'a atteint le seuil de signification de 5 %. Ces tendances appuient l'idée que la RA conjuguée à un support pédagogique riche (vidéo ou texte) peut renforcer l'apprentissage initial.

⁶¹ PAMPLONA, Fabricio, 2022. Analyse post-hoc : Processus et types de tests. *Mind the Graph Blog* [en ligne]. 28 juillet 2022. Disponible à l'adresse : <https://mindthegraph.com/blog/fr/analyse-post-hoc/> [consulté le 30 mai 2025].

6.2. Rétention des connaissances à long terme (QCM à 1 mois)

Un mois après l'apprentissage, les participants ont répondu au même QCM. Sans surprise, les scores moyens ont diminué dans tous les groupes par rapport au test immédiat, témoignant d'un oubli partiel naturel sur 30 jours. Néanmoins, des différences importantes persistent entre les conditions expérimentales.

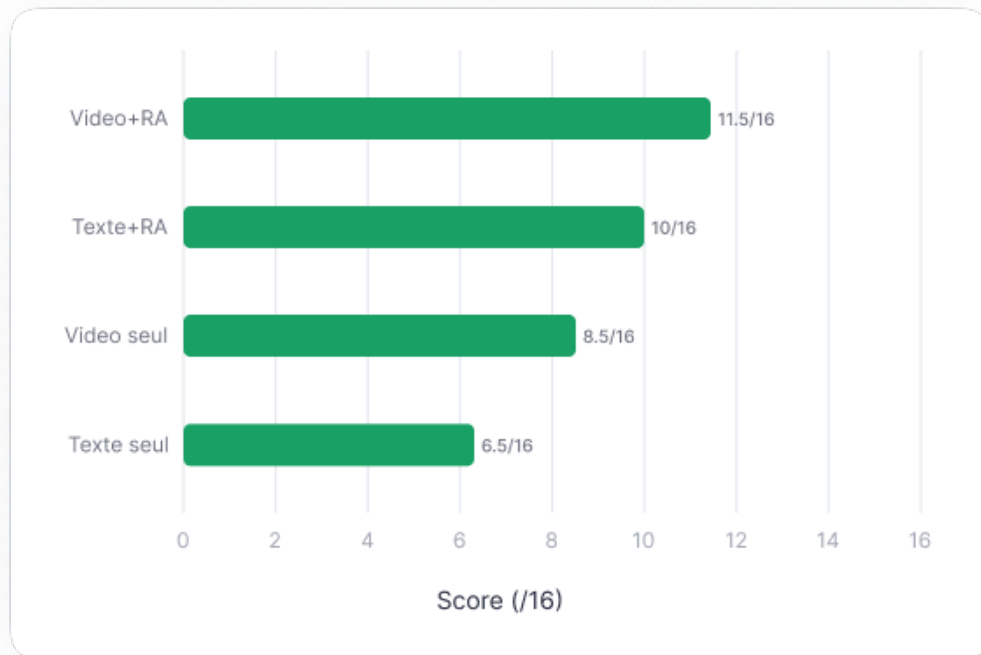


Figure 7 : Scores moyens du QCM (sur 16) par groupe (à 1 mois)

La Figure 7 montre que le classement des groupes demeure similaire à celui du test initial, le groupe Vidéo + RA conserve la meilleure performance moyenne ($\approx 11,5/16$), suivi de Texte + RA ($\sim 10,0/16$), puis Vidéo seul ($\sim 8,5/16$), et enfin Texte seul ($\sim 6,5/16$) qui obtient le score le plus faible. L'écart absolu entre le meilleur et le pire groupe s'est même légèrement creusé après un mois (environ 5 points de différence, contre 4 points lors du test immédiat). Cela suggère que l'intégration de la RA a non seulement amélioré l'apprentissage initial, mais a aussi contribué à un meilleur maintien des connaissances dans le temps. Notamment, les participants ayant utilisé la RA (groupes Texte+RA et Vidéo+RA)

ont mieux résisté à l'oubli : ils n'ont perdu en moyenne qu'environ 2 points entre le test immédiat et celui de 1 mois, alors que les groupes sans RA en ont perdu ~2,0 à 2,5 points en moyenne (voir Tableau 2).

Le test de Kruskal-Wallis sur les scores de rétention à 1 mois révèle également une différence significative entre les groupes ($H(3)=11,57 / p = 0,009$). Ainsi, le facteur de groupe a un effet sur la mémoire à long terme du contenu appris.

	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	p	Adj. p
Text only - Video only	-3.4	3.71	-0.92	.359	1
Text only - Text+AR	-8.1	3.71	-2.18	.029	.174
Text only - Video+AR	-11.7	3.71	-3.16	.002	.01
Video only - Text+AR	-4.7	3.71	-1.27	.205	1
Video only - Video+AR	-8.3	3.71	-2.24	.025	.151
Text+AR - Video+AR	-3.6	3.71	-0.97	.332	1

Tableau 4 : Scores Dunn-Bonferroni-Tests au QCM après 1 mois avec Adj.p étant les valeurs ajustées avec la correction de Bonferroni

Le test post-hoc de Dunn-Bonferroni (Tableau 4) indique que, là encore, la différence de score entre le groupe Texte seul et le groupe Vidéo + RA est statistiquement significative (p ajusté = 0,01). Aucun autre écart entre deux groupes n'atteint le seuil de 5 %. Cela confirme que les groupes intégrant la RA obtiennent des performances de rétention supérieures, en particulier l'avantage marqué du support Vidéo enrichi de RA par rapport à un apprentissage textuel classique. On observe par ailleurs que le classement des groupes est resté identique à celui mesuré immédiatement après l'apprentissage, aucun groupe n'ayant inversé la tendance initiale. L'avantage initial conféré par la RA (et dans une moindre mesure par le support vidéo) s'est donc maintenu après un mois, ce qui suggère que la RA a contribué à consolider les acquis sur le long terme.

6.3 . Charge cognitive et effort mental

La charge cognitive rapportée par les participants, mesurée juste après la tâche d'apprentissage via le NASA-TLX (score global sur 100) et l'échelle d'effort mental, présente également des différences notables entre groupes.

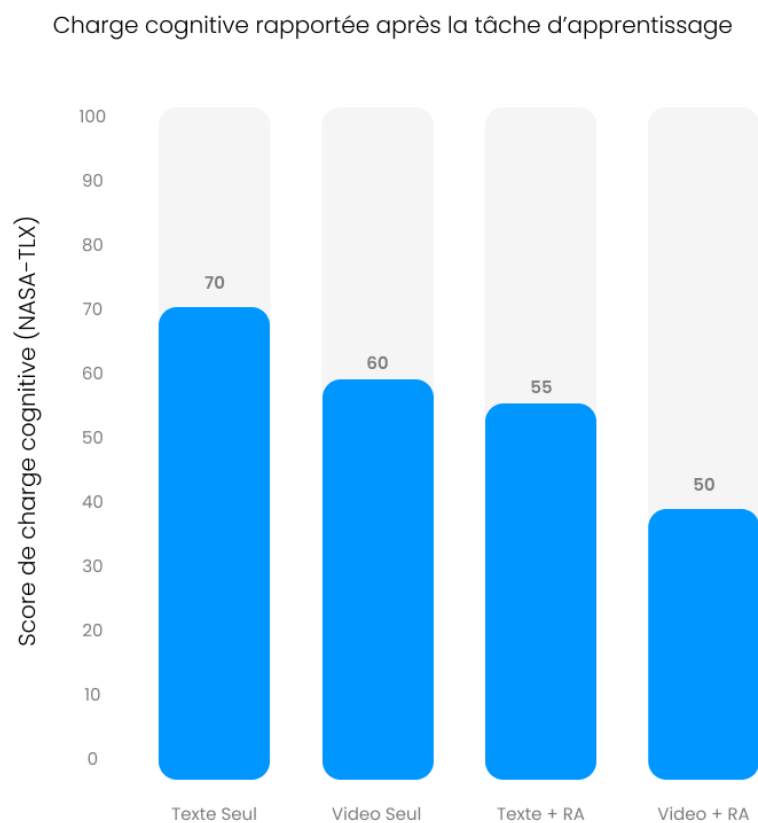


Figure 8 : Scores de charge cognitive rapportée selon le type de support d'apprentissage (NASA-TLX)

En analysant ces résultats on conclue que le groupe texte a éprouvé la plus forte charge cognitive (score TLX $\approx 70/100$ en moyenne), suivi du groupe vidéo ($\sim 60/100$). Les participants des groupes avec RA ont évalué leur charge de travail mentale à des niveaux inférieurs : 55/100 pour Texte + RA et 50/100 pour Vidéo +

RA, ce dernier étant le groupe avec la charge perçue la plus faible. Les écarts sont cohérents avec ce qu'on pouvait anticiper.

L'absence de support visuel dans le groupe texte semble avoir augmenté la charge cognitive (une hypothèse était que les apprenants devaient mentalement imaginer les processus, ce qui alourdit la charge intrinsèque et extrinsèque), tandis que la vidéo et surtout la RA ont aidé à réduire la charge cognitive extrinsèque en fournissant des représentations imagées concrètes, allégeant ainsi l'effort mental nécessaire pour comprendre la photosynthèse.

Un écart de presque 20 points est remarqué sur l'échelle 0-100, entre le groupe le plus chargé (Texte seul, ~70) et le moins chargé (Vidéo + RA, ~50). Il faut noter que le groupe Texte + RA (55) a un score de charge cognitive moyen bien inférieur au groupe Texte seul est intéressant, ce qui suggère que l'apport de la RA a compensé la difficulté inhérente du texte en offrant un secours visuel. D'un autre côté, le groupe vidéo + RA finit par un score légèrement inférieur à celui du groupe vidéo seul, ce qui démontre que, même lorsque le contenu est déjà visuel (vidéo), l'ajout de la RA contribue à diminuer encore la charge (peut-être en permettant aux participants d'interagir et de clarifier activement les concepts, rendant l'apprentissage moins passif et moins frustrant).

L'analyse statistique par Kruskal-Wallis confirme également une différence globale significative de charge cognitive entre les quatre conditions ($H(3) = 6,91$, $p = 0,075$). En d'autres termes, le type de support influence significativement la charge cognitive perçue pendant l'apprentissage. Quant à l'échelle d'effort mental, les résultats vont dans le même sens, le groupe Texte seul a rapporté un effort moyen de 8/10, contre 5/10 seulement pour Vidéo + RA (les autres groupes étant intermédiaires, environ 6/10 pour Vidéo et environ 5.5/10 pour Texte+RA). Ces scores subjectifs supplémentaires, bien que moins précis que le TLX, corroborent les différences de charge cognitive entre conditions.

	Test Statistic	Std. Error	Std. Test Statistic	p	Adj. p
Text only - Video only	4.7	3.73	1.26	.208	1
Text only - Text+AR	7.2	3.73	1.93	.054	.322
Text only - Video+AR	9.3	3.73	2.49	.013	.076
Video only - Text+AR	2.5	3.73	0.67	.503	1
Video only - Video+AR	4.6	3.73	1.23	.218	1
Text+AR - Video+AR	2.1	3.73	0.56	.573	1

Tableau 5 : Scores Dunn-Bonferroni-Tests au NASA-TLX avec Adj.p etant les valeurs ajustées avec la correction de Bonferroni.

Un test post-hoc de Dunn-Bonferroni (Tableau 5) n'a pas mis en évidence de différences statistiquement significatives entre des paires spécifiques de groupes après correction rigoureuse ($p < 0,05$), sans doute en raison de la taille d'échantillon réduite. Toutefois, la plus forte contrastation observée oppose le groupe Texte seul au groupe Vidéo + RA (p ajusté $\approx 0,076$), ce qui corrobore l'idée que l'intégration de la RA tend à réduire la charge cognitive par rapport à un apprentissage purement textuel.

L'analyse des données permet de statuer clairement sur chacune des hypothèses initiales du travail. L'hypothèse 1 postulait que l'usage de la RA pendant l'apprentissage améliorerait la performance immédiate par rapport aux supports classiques. Ce postulat est pleinement confirmé par nos résultats : les groupes ayant bénéficié de RA ont obtenu des scores significativement plus élevés aux tests d'évaluation immédiatement après la séance d'apprentissage que les groupes témoins sans RA. L'hypothèse 2 anticipait qu'en intégrant la RA, les apprenants conserveraient mieux les connaissances à plus long terme. Elle est elle aussi validée, puisque un mois après la séance, les participants des groupes RA ont retenu davantage d'informations que ceux des conditions texte ou vidéo seules – indiquant une consolidation supérieure des acquis due à la RA. L'hypothèse 3 proposait que la RA réduirait la charge cognitive perçue des apprenants par rapport aux supports traditionnels. Les résultats confortent effectivement cette idée : les participants utilisant un support enrichi en RA ont rapporté une charge mentale et un effort perçu plus faibles (scores NASA-TLX inférieurs) que les autres, ce qui suggère que la RA a allégé la charge cognitive extrinsèque pendant la tâche d'apprentissage. Enfin, l'hypothèse 4 portait sur une interaction entre le type de support et l'usage de la RA – en d'autres termes, un effet de la RA plus marqué pour un support texte que pour la vidéo. Nos observations vont dans ce sens : l'apport de la RA s'est révélé particulièrement bénéfique pour le support textuel (le groupe Texte+RA a nettement surpassé le groupe Texte seul et même dépassé la performance du groupe Vidéo seul), tandis que l'amélioration due à la RA, bien que réelle, était moins spectaculaire avec un support vidéo déjà visuel. Néanmoins, cette différence d'impact n'a pu être confirmée statistiquement de manière ferme (probablement en raison de la taille d'échantillon réduite) – l'hypothèse 4 peut donc être considérée comme seulement partiellement confirmée à ce stade.

Pour résumer, les résultats de la recherche affirment haut et fort que grâce à la Réalité Augmentée, l'apprentissage de la photosynthèse s'est fortement amélioré (à la fois immédiatement et sur le long terme) tout en ayant la charge cognitive que les étudiants perçoivent plus faibles. Dans la section suivante, nous discuterons de la portée de ces

résultats, de leur concordance avec la littérature existante et de leurs implications pédagogiques.

Chapitre VII: Discussion

Les résultats obtenus apportent des éléments de réponse consensuels à notre question de recherche sur l'impact de la RA dans l'apprentissage de la photosynthèse, mais en même temps soulèvent des interrogations. Dans ce chapitre, nous expliquons ces résultats à la lumière des théories cognitives et des études antérieures, nous étudions en quelle mesure l'usage de la RA a eu une influence sur la performance d'apprentissage et la charge cognitive, et nous exposons les implications pédagogiques ainsi que les correspondances ou écarts par rapport aux travaux existants (notamment la théorie de Mayer du double canal, le double codage de Paivio⁶², la charge cognitive, et les effets spécifiques de la RA en éducation).

7.1. Effet de la Réalité Augmentée sur la performance et la charge cognitive

L'étude que nous avons menée a permis de démontrer les bienfaits globaux de la Réalité Augmentée sur les étudiants : les deux groupes d'étudiants qui ont utilisé l'application RA (que ce soit avec du texte ou une vidéo) affichaient des résultats nettement plus élevés tant aux QCM immédiats qu'au QCM de rétention, par rapport aux groupes sans RA. Ce résultat est comparable à plusieurs études récentes dans lesquelles la RA a été citée comme apport positif pour la performance académique. Par exemple, Badilla-Quintana et al.⁶³ et plusieurs autres chercheurs (Tableau 1) ont aussi rapporté qu'il y a eu des résultats significativement meilleur à l'issue des enseignements par RA dans un cadre scientifique des apprentissages à court et long terme grâce à la RA dans un contexte scientifique. De même, dans une méta-analyse qui a couvert dix ans de recherches sur la RA éducative, Garzón & Acevedo⁶⁴ rapportent un effet moyen positif de la RA sur les résultats des étudiants, plus particulièrement chez les étudiants de niveau licence. Nos résultats s'inscrivent donc dans cette tendance, en suggérant que la RA, en offrant des visualisations interactives en 3D de phénomènes complexes, aide les apprenants à mieux comprendre et retenir les informations clés.

Sur le sujet de la charge cognitive, nos statistiques révèlent que la RA a réussi à réduire cette charge du point de vue des étudiants. Cette perception de la diminution de charge peut être expliquée par la raison que la RA permet de supprimer la charge extrinsèque inutile et de rendre les concepts abstraits plus concrets. D'après la Théorie de la Charge Cognitive⁶⁵, la charge extrinsèque concerne les efforts mentaux superflus liés à la manière dont l'information est présentée plutôt qu'au contenu lui-même. Dans le cas de la

⁶² Dual-coding theory, 2024Wikipedia [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dual-coding_theory&oldid=1254899468 [consulté le 13 décembre 2024]. Page Version ID: 1254899468

⁶³ BADILLA-QUINTANA, María Graciela, SEPULVEDA-VALENZUELA, Eileen et SALAZAR ARIAS, Margarita, 2020. Augmented Reality as a Sustainable Technology to Improve Academic Achievement in Students with and without Special Educational Needs. *Sustainability*. Vol. 12, no 19, p. 8116. DOI [10.3390/su12198116](https://doi.org/10.3390/su12198116).

⁶⁴ GARZÓN, Juan et ACEVEDO, Juan, 2019. Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*. Vol. 27, pp. 244-260. DOI [10.1016/j.edurev.2019.04.001](https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001).

⁶⁵ SWELLER, John, AYRES, Paul et KALYUGA, Slava, 2011. *Cognitive Load Theory*. New York, NY : Springer. ISBN 978-1-4419-8125-7.

photosynthèse, un seul texte a tendance à créer une charge extrinsèque élevée car l'étudiant doit faire un effort mental considérable pour voir les étapes microscopiques du processus. En revanche, la RA fournit directement cette visualisation, ce qui allège la charge extrinsèque et permet aux ressources cognitives de l'apprenant de se concentrer sur le traitement des relations conceptuelles pertinentes plutôt que d'être mobilisées par la seule imagination des mécanismes. Nos participants en condition RA ont ainsi déclaré moins d'effort mental et obtenu des scores NASA-TLX inférieurs, ce qui appuie l'hypothèse formulée en amont que la RA facilite le traitement cognitif des informations complexes. Ce résultat rejoint les observations d'Akçayır M & Akçayır G⁶⁶, dont la revue de littérature souligne que si la RA est bien conçue, elle peut réduire la difficulté perçue de l'apprentissage en rendant les contenus plus accessibles et concrets, bien qu'ils notent aussi certains défis (par exemple, risque de surcharge si l'interface est mal maîtrisée).

Il convient toutefois de nuancer que la diminution de la charge cognitive ne signifie pas nécessairement qu'il y a eu moins d'apprentissage, bien au contraire. Dans notre étude, la RA a probablement agi en libérant l'apprenant d'une partie du fardeau mental inutile, elle a permis de consacrer plus de capacité mentale à l'assimilation du concept de photosynthèse lui-même et du coup de meilleures performances aux tests.

La rétention à long terme et la RA sont positivement liées à ce phénomène qui peut également s'interpréter à partir de la perspective suivante: Les apprenants RA ont en toute probabilités construits des cartes mentales qui sont à la fois plus riches et plus durables, car elles sont soutenues par des expériences visuelles interactives marquantes. Cette l'idée est en accord avec la théorie du double codage de Paivio⁶⁷ qui dit que l'information encodée de manière verbale et visuelle a plus de chances d'être rappelée plus tard. En fournissant une double représentation (texte/vidéo + modèle 3D en superposition), la RA favorise un encodage multimodal des connaissances. En d'autres termes, un étudiant du groupe Texte+RA aurait en mémoire non seulement les phrases lues mais aussi les images 3D manipulées pour représenter ces phrases ainsi que l'expérience en elle-même, ce qui multiplie les chemins d'accès en mémoire et solidifie l'apprentissage.

7.2. Comparaison des modalités Texte vs. Vidéo à la lumière du double canal

Indépendamment de la RA, notre étude a également mis en évidence une différence de performance entre les supports traditionnels, à savoir le texte seul et la vidéo seule. De manière générale, le groupe ayant utilisé la vidéo a obtenu de meilleurs résultats que le groupe texte, aussi bien à court terme qu'à long terme. La vidéo mobilise simultanément le canal visuel (images animées, schémas de la photosynthèse) et le canal verbal (narration audio), ce qui permet un traitement de l'information plus efficace que le texte, qui sollicite

⁶⁶ AKÇAYIR, Murat et AKÇAYIR, Gökçe, 2017. Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. *Educational Research Review*. Vol. 20, pp. 1-11. DOI [10.1016/j.edurev.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002).

⁶⁷ Dual-coding theory, op. cit.

principalement le canal verbal (lecture). Mayer postule que lorsque les deux canaux de la mémoire de travail sont engagés de manière coordonnée, la charge cognitive est mieux répartie et l'apprentissage amélioré – c'est l'effet multimédia. Dans notre situation, la vidéo des Amoeba Sisters sert d'exemple en démontrant le processus de formation du glucose à travers le déplacement de molécules, épargnant ainsi au spectateur l'effort d'imaginer ces mouvements ; simultanément, le commentaire audio explique le phénomène, facilitant ainsi la compréhension. En revanche, un texte uniquement descriptif force à tout élaborer mentalement et peut provoquer des représentations mentales moins exactes ou incorrectes chez certains étudiants. Il n'est donc pas étonnant que le groupe de texte ait subi la plus grande charge cognitive et réalisé la moins bonne performance.

Il faut souligner que l'ajout de la RA a profité aux deux types de supports, mais de manière différente. Pour le texte, la RA a fourni ce que le texte n'avait pas, un équivalent visuel et interactif, ce qui a radicalement transformé l'expérience d'apprentissage (d'où un grand saut de performance de 8,5 à 12/16 en moyenne avec RA, et une nette baisse de charge). Quant à la vidéo, la RA a servi de complément actif après un support déjà visuel : l'effet est moins spectaculaire en chiffres (vidéo seul 10,8 vs vidéo+RA 13,4) mais néanmoins substantiel. On peut l'expliquer par le passage d'un mode passif (regarder une vidéo) à un mode actif (explorer un modèle 3D). Des travaux comme ceux d'Allcoat et al.⁶⁸ montrent que les environnements d'apprentissage immersifs et interactifs (RA, RV) induisent souvent un plus fort engagement émotionnel et cognitif que les méthodes passives traditionnelles. Dans leur étude, les étudiants en RA/RV étaient plus motivés et plus engagés, ce qui peut contribuer à de meilleurs résultats. Il est possible que dans notre expérience, la RA ait stimulé la curiosité et l'attention des apprenants (par exemple un effet de nouveauté positif), renforçant ainsi l'encodage des connaissances présentées initialement dans la vidéo.

En outre, la RA permet une forme d'apprentissage par exploration complémentaire : par exemple, après avoir vu dans la vidéo les différents éléments, l'étudiant pouvait manipuler en RA les feuilles, ce qui consolide la compréhension via un nouveau point de vue.

Nos résultats confirment donc l'intérêt d'utiliser des approches multimodales en enseignement, combinant texte, image, audio ainsi qu'interactivité. Ils suggèrent qu'une approche avec texte + RA pourrait être une alternative aussi efficace (sinon plus) qu'une vidéo sans RA. Comme on a pu le constater, le groupe ayant un support texte avec réalité augmentée a surpassé le groupe vidéo seul. Il s'agit d'un point de vue qui mérite d'être considéré d'un point de vue pédagogique, on entend par là que même sans matériel vidéo sophistiqué, on pourrait rendre un cours de texte traditionnel plus interactif par le biais de la RA et ainsi avoir un résultat similaire ou même meilleur. En revanche, cela pourrait également signifier que la RA ouvrirait à plus d'enseignants comme outil d'amélioration des supports déjà existants (exemple, manuels scolaires avec une application de RA).

⁶⁸ Education in the Digital Age: Learning Experience in Virtual and Mixed Realities - Devon Allcoat, Tim Hatchard, Freeha Azmat, Kim Stansfield, Derrick Watson, Adrian von Mühlenen, 2021, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0735633120985120> [consulté le 07 janvier 2025].

7.3. Pertinence pédagogique de la RA dans l'enseignement des sciences

Les trouvailles de cette étude offrent plusieurs enseignements concrets pour l'éducation et la formation, notamment dans l'enseignement des sciences :

7.3.1. Valeur ajoutée de la RA pour les sujets complexes :

D'un point de vue pédagogique, l'intégration de la RA dans l'enseignement de la photosynthèse apparaît très prometteuse à la lumière de cette étude. La photosynthèse peut être un processus difficile à appréhender pour les étudiants car il se déroule à une échelle microscopique et implique des concepts abstraits (énergie lumineuse transformée en énergie chimique, électrons etc.) La RA offre la possibilité de rendre tangible l'invisible et cela représente un atout majeur pour l'éducation scientifique. Nos participants des groupes RA ont pu voir concrètement une feuille en 3D, localiser les chloroplastes, puis zoomer à l'intérieur pour observer les thylakoïdes où se produisent les réactions lumineuses. Ceci représente une très grande opportunité, par exemple un enseignant disposant principalement de textes peut enrichir ceux-ci par de la RA en rendant des phénomènes complexes "réels" par la RA, on réduit donc l'écart entre théorie et pratique, ce qui, comme de précédents travaux l'ont noté (Tableau 1), rend les sujets complexes plus engageants, accessibles et renforce le lien entre les concepts théoriques et leur réalité physique. Pour ces enseignants, investir dans la création ou l'adoption de contenus RA pourrait donc améliorer la compréhension des étudiants sans nécessiter de changer tout le matériel pédagogique existant (la RA venant en complément du cours traditionnel).

7.3.2 Multimodalité et engagement :

Le fait que le groupe Vidéo+RA soit celui qui performe le mieux suggère que combiner plusieurs modalités peut apporter un bénéfice cumulatif, du moment que chaque modalité apporte une dimension différente. Dans notre cas, la vidéo offrait la narration guidée et l'humour des créatrices, tandis que la RA offrait l'interactivité et le contrôle par l'apprenant. Ensemble, ils ont maximisé l'engagement. Cela invite les pédagogues à concevoir des parcours d'apprentissage multimodaux : par exemple, débiter par une vidéo introductive pour motiver et donner une vue d'ensemble, puis laisser les étudiants explorer en RA pour approfondir activement, avant de conclure par une discussion ou un quiz. L'aspect ludique de la RA peut stimuler la motivation intrinsèque "J'étudie la chimie parce que je la trouve passionnante" vs "J'étudie la chimie pour avoir une bonne note". Plusieurs participants de nos groupes RA ont exprimé avoir trouvé l'apprentissage "amusant" et "stimulant", ce qui est de bon augure car un étudiant motivé apprend mieux. Nos observations rejoignent ainsi les

nombreuses études signalant que la RA améliore la motivation et l'attitude des apprenants.

7.3.3 Gestion de la charge cognitive :

Bien que la RA n'ait pas induit de surcharge dans notre étude, elle nécessite malgré tout un certain encadrement. Pour un usage en classe, les enseignants devront prévoir un temps d'appropriation de l'outil par les élèves, et les guider initialement pour éviter qu'ils ne se perdent dans l'exploration au détriment des objectifs d'apprentissage. Il peut être judicieux d'intégrer des scénarios pédagogiques structurés pour la RA : par exemple, des fiches d'activités qui orientent l'étudiant sur quoi observer ou manipuler dans l'application RA, afin de garantir qu'il en retire le message attendu. Nos résultats montrent que la RA est efficace même en laissant une certaine liberté aux apprenants (comme nous l'avons fait), mais en contexte scolaire avec un large groupe, un guidage suffisant évitera que certains élèves n'en fassent un usage dispersé. En outre, l'enseignant devra veiller à la complémentarité des supports pour éviter de répéter exactement la même information sur tous les supports, au risque d'ennuyer ou de surcharger inutilement. Au lieu de cela, la RA devrait apporter un nouveau regard (par exemple une autre représentation ou une activité pratique) sur la notion vue en cours pour maximiser l'intérêt pédagogique de chaque média utilisé.

7.3.4 Personnalisation et remédiation :

La RA ouvre aussi la porte à plus de personnalisation de l'apprentissage. Un point intéressant de l'application McGraw Hill AR est qu'elle permet aux apprenants d'avancer à leur propre rythme et de refaire l'activité si besoin. Les apprenants plus rapides peuvent explorer des détails supplémentaires, tandis que les plus lents peuvent revoir une animation plusieurs fois. En contexte de remédiation, un étudiant qui n'a pas bien compris un concept en cours pourrait, par le biais de la RA, le revisualiser et l'expérimenter de manière autonome jusqu'à ce qu'il le maîtrise mieux. Ainsi, la RA pourrait servir d'outil de soutien différencié, ce qui est précieux dans des classes hétérogènes. Nos données suggèrent que même si la RA demande un petit effort d'interaction, les bénéfices en valent la peine, donc inciter les étudiants à l'utiliser en dehors du temps de classe (par exemple à la maison, pour revoir la leçon de façon interactive) pourrait améliorer globalement la compréhension de la matière dans le groupe.

Pour concrétiser tous ces avantages, il faudra veiller à former les enseignants à ces nouvelles technologies. Il ne suffit pas mettre une application dans les mains des élèves, l'enseignant doit être à l'aise avec son fonctionnement et convaincu de sa valeur pédagogique. Des ateliers de formation continue pourraient être mis en place, où les professeurs testent la RA liée à leur discipline et conçoivent avec des experts des séquences pédagogiques augmentées. Par ailleurs, l'accessibilité technique doit être assurée, toutes les écoles n'ont pas de casques AR ou même suffisamment de smartphones pour chaque élève.

Cependant, le fait que l'application utilisée fonctionne sur un simple téléphone ou tablette est encourageant – l'équipement nécessaire est de plus en plus répandu dans les foyers ou les établissements. On peut imaginer à court terme des classes où la moitié des élèves utilisent leur propre smartphone en RA par binômes, ce qui limiterait l'investissement. Au vu des retours très positifs des apprenants dans diverses études (y compris la nôtre), il est probable que les élèves adhéreront volontiers à ces activités, ce qui facilitera leur mise en œuvre pratique.

En résumé, notre recherche met en évidence les conséquences pédagogiques qui favorisent une utilisation judicieuse et complémentaire de la réalité augmentée dans le domaine de l'éducation. Plutôt que de substituer les approches conventionnelles, la RA élargit l'éventail d'instruments disponibles pour optimiser le processus d'apprentissage, surtout pour des contenus de nature complexe. Grâce à une motivation renforcée, une rétention supérieure et un transfert de connaissances facilité qu'elle semble offrir, la RA peut être un puissant levier pédagogique pour améliorer l'apprentissage des sciences. Elle agit à la fois sur le plan cognitif (meilleure compréhension, double codage, réduction de la charge cognitive) et sur le plan motivationnel (engagement, intérêt accru), ce qui en fait d'elle une technologie éducative holistique. Les enseignants peuvent envisager non seulement d'améliorer les performances académiques, mais également d'encourager un apprentissage plus riche en signification et durable chez leurs élèves.

Chapitre VIII: Limites et Recommandations

Malgré le soin apporté à cette recherche, il est important d'en reconnaître les limites afin d'interpréter les conclusions de façon nuancée et de proposer des pistes d'amélioration pour de futures études. Nous présentons d'abord les principales limites de notre travail, puis formulons des recommandations tant pour les recherches ultérieures que pour la pratique éducative.

8.1. Limites de l'étude

8.1.1 Taille d'échantillon restreinte :

Avec seulement 20 participants (5 par condition), la puissance statistique de nos tests est limitée. Une taille d'échantillon aussi réduite accroît le danger de manquer certaines variations effectives et peut rendre les résultats vulnérables aux valeurs extrêmes. Par exemple, un membre engagé ou talentueux au sein d'un groupe pourrait avoir une grande influence sur la moyenne de ce groupe. Dans notre étude, bien que des divergences significatives sur le plan statistique aient été révélées (Kruskal-Wallis), il serait préférable de valider ces tendances avec un échantillon plus vaste pour améliorer la fiabilité et la solidité.

8.1.2 Biais de volontariat :

Bien que les participants soient répartis aléatoirement, ils ne constituent pas un échantillon aléatoire de la population générale. Il s'agit majoritairement d'étudiants volontaires, possiblement plus curieux des technologies que la moyenne. Il est donc possible qu'ils aient adopté dès le départ une perspective plus favorable à l'égard de la RA, ou qu'ils soient plus familiers avec les outils numériques que la majorité. Ce biais de sélection peut exagérer l'efficacité de la RA, car un auditoire moins axé sur la technologie ou moins engagé pourrait avoir une réaction différente. De plus, étant donné qu'ils prenaient part à une recherche sur un outil novateur, certains participants ont peut-être intensifié leur vigilance pour bien performer ou chercher à obtenir une excellente note, surtout dans les groupes RA. Cela ne reflète pas nécessairement une situation de classe courante.

8.1.3 Environnement d'apprentissage non contrôlé :

L'étude s'est déroulée intégralement en distanciel via Google Meet, ce qui implique que chaque participant était dans son propre environnement (chambre, salon, etc.) durant l'apprentissage. Malgré nos consignes de se mettre au calme, nous n'avons pas la maîtrise des distractions potentielles (bruits, notifications, etc.) ni des variations de matériel (taille d'écran, qualité de la connexion internet, etc.). Par

exemple, un participant du groupe Vidéo a mentionné après coup que sa connexion s'était figée quelques instants pendant la vidéo – ce genre d'élément peut altérer l'expérience d'apprentissage. Idéalement, une étude en présentiel aurait permis de contrôler ces variables (même matériel pour tous, environnement identique).

8.1.4 Absence de mesures objectives de la charge cognitive :

Nous nous sommes appuyés sur des mesures subjectives (NASA-TLX). Celles-ci sont pratiques et validées en éducation, mais elles comportent une part de subjectivité et de biais (biais de complaisance, difficulté pour l'apprenant à estimer précisément son effort etc. Des mesures physiologiques (par ex. suivi oculaire, rythme cardiaque, EEG) auraient pu compléter le bilan en fournissant des indicateurs objectifs de charge mentale pendant l'apprentissage. De même, nous n'avons pas inclus de mesures qualitatives (entretien, observation fine des comportements pendant l'apprentissage) qui auraient pu enrichir la compréhension de comment la RA a aidé ou gêné les apprenants. Par exemple, a-t-on observé des signes d'effet de nouveauté ou de débordement attentionnel (certains étudiants étant éventuellement plus fascinés par la technologie que par le contenu) ? Notre protocole ne permet pas de le dire précisément, ce qui est une limite.

8.1.5 Durée et étendue de l'apprentissage :

La session d'apprentissage était relativement courte (15 minutes) et ciblée sur un seul concept. Il n'est pas certain que les effets observés se maintiennent pour des apprentissages plus longs ou d'autres sujets. Par exemple, utiliser la RA de façon prolongée pourrait entraîner une fatigue cognitive ou visuelle qui n'est pas apparue sur 15 minutes. De plus, la photosynthèse se prête bien à la visualisation 3D ; il faudrait tester si la RA est tout aussi efficace sur d'autres contenus moins spatiaux (par ex. des concepts mathématiques abstraits). Nos résultats ne doivent donc pas être automatiquement extrapolés à littéralement toute situation d'apprentissage.

8.1.6 Pas de distinction des types de charge cognitive :

Notre question de recherche initiale distinguait charge intrinsèque, extrinsèque et pertinente. Or, nos mesures donnent une estimation globale de la charge, sans différencier ces composantes. Il est donc difficile de savoir précisément quelle dimension de la charge a été affectée par la RA. On a inféré que c'est surtout l'extrinsèque qui a diminué (ce qui est plausible théoriquement), mais une mesure spécifique aurait été utile. Par exemple, un questionnaire ciblé sur la charge extrinsèque vs intrinsèque aurait pu apporter cette nuance.

8.1.7 Analyse statistique limitée :

Malgré un plan expérimental factoriel 2×2 , nous n'avons pas employé d'ANOVA à deux facteurs pour analyser simultanément les effets du type de support et de la RA, en raison de la taille d'échantillon réduite ($N = 20$, soit $n = 5$ par condition) et du non-respect des conditions de normalité et d'homogénéité des variances. Nous avons jugé plus prudent d'utiliser des tests non paramétriques, plus adaptés à notre jeu de données, afin d'assurer la validité des analyses. Si l'on souhaitait malgré tout examiner les effets factoriels de manière exploratoire, on pourrait formuler l'hypothèse d'un effet principal positif de la RA sur les performances d'apprentissage, ainsi que d'une interaction possible entre les facteurs, l'écart induit par la RA semble visuellement plus prononcé pour le support texte que pour le support vidéo. Toutefois, compte tenu du faible effectif, une telle analyse factorielle manquerait de puissance et ses résultats demeureraient incertains. Nous avons donc préféré nous en tenir à des tests globaux (Kruskal-Wallis), suivis de comparaisons post hoc non paramétriques, afin de tirer des conclusions quantitatives fiables tout en restant prudents à la portée de ces résultats.

8.1.8 Absence d'un groupe « RA seul » :

Par choix conceptuel (et en raison du manque d'applications contenant suffisamment d'informations sur la photosynthèse en elle-même), nous avons systématiquement associé la réalité augmentée (RA) à un support traditionnel (texte ou vidéo). Il aurait été instructif d'avoir un groupe expérimentant uniquement l'application de RA, sans texte explicatif ni vidéo. Cela nous aurait permis de déterminer si la RA, en tant que telle et sans autre support, pouvait produire un apprentissage équivalent. Nous ne l'avons pas fait, car l'application de RA utilisée avait été conçue comme un complément, elle ne fournit pas toutes les explications, mais présente essentiellement des animations. Néanmoins, cette absence nous empêche de quantifier l'apport exact de la RA seule par rapport aux autres médias.

8.1.9 Pas de mesure directe de la motivation ou de l'engagement :

Nous n'avons pas quantifié la motivation ou l'intérêt via un questionnaire. Il aurait été pertinent d'évaluer la motivation (par exemple avec une échelle d'attention/engagement) pour voir si les groupes RA étaient significativement plus motivés. Cela aurait permis de relier éventuellement les meilleures performances non seulement à l'aspect cognitif mais aussi à un facteur motivationnel (qui peut moduler l'apprentissage). De même, nous n'avons pas mesuré la satisfaction ou l'acceptabilité de l'outil, ce qui aurait été précieux pour juger du potentiel de déploiement de la RA en contexte réel.

Pour conclure, même si notre recherche apporte des contributions importantes, ces limitations nous incitent à éviter toute généralisation excessive. Dans le cadre spécifique que nous avons étudié, les résultats sont pertinents, mais des recherches supplémentaires seront indispensables pour renforcer et élargir ces conclusions.

8.2. Recommandations pour les futures recherches

À la lumière de ces limites et des enseignements tirés, nous proposons plusieurs recommandations :

8.2.1 Élargir l'échantillon et la diversité des participants :

Des études ultérieures devraient impliquer davantage d'apprenants, et si possible issus de contextes variés (âges différents, niveaux scolaires variés, et y compris des élèves moins à l'aise avec la technologie). Un échantillon plus large permettrait non seulement d'augmenter la fiabilité statistique, mais aussi de conduire des analyses plus poussées (d'autres tests de motivation..etc). Par ailleurs, inclure un plus grand nombre de participants permettrait peut-être de dégager des profils d'apprenants pour qui la RA est particulièrement bénéfique (ou au contraire, moins utile). Par exemple, les apprenants visuo-spatiaux bénéficieront-ils davantage de la RA que ceux ayant un style d'apprentissage plus verbal ? Ce sont des questions ouvertes.

8.2.2 Varier les domaines d'apprentissage et la durée :

Il serait instructif de reproduire un protocole similaire sur d'autres thèmes scientifiques (ou même non scientifiques) pour vérifier si l'effet de la RA se généralise. De plus, tester la RA sur un module d'apprentissage plus long (plusieurs séances, ou un chapitre entier de cours) permettrait d'observer si l'efficacité se maintient dans le temps et si les étudiants ne se lassent pas de la technologie. Peut-être qu'après l'effet de nouveauté initial, la RA devient un outil comme un autre ; il serait intéressant de voir si les gains restent significatifs sur le long terme et pour des contenus plus volumineux.

8.2.3 Mesures de charge cognitive plus fines :

Afin de mieux saisir l'impact de la RA sur la charge cognitive, des recherches futures pourraient associer des évaluations subjectives approfondies (comme distinguer la charge perçue extrinsèque de l'intrinsèque) à des indicateurs objectifs. Par exemple, on pourrait mesurer le taux de clignement des yeux ou la dilatation pupillaire des apprenants pendant qu'ils utilisent la RA, ces indicateurs étant associés

à l'effort cognitif. De même, une analyse du comportement d'exploration dans l'application RA (temps passé, interactions effectuées) pourrait informer sur la charge, un étudiant submergé pourrait manipuler moins ou de façon désordonnée l'application. Ces données aideraient à optimiser le design des applications RA pour qu'elles apportent un maximum d'information tout en restant intuitives.

8.2.4 Approche mixte quantitative-qualitative :

Il serait pertinent d'ajouter une composante qualitative (entretiens, questionnaires ouverts) recueillant le ressenti des apprenants sur l'expérience. Qu'ont-ils particulièrement apprécié dans l'outil RA ? Ont-ils noté des difficultés (techniques ou cognitives) lors de son utilisation ? Ont-ils des suggestions pour améliorer l'intégration de la RA dans le cours ? Ce retour de terrain serait précieux pour guider le développement futur d'applications éducatives en RA et pour former les enseignants à leur utilisation. Par exemple, si certains étudiants disent s'être sentis un peu perdus entre le texte et le modèle RA, cela suggérerait de mieux intégrer pédagogiquement la RA (peut-être en guidant l'élève à travers un scénario dans l'appli plutôt qu'en libre exploration totale).

8.2.5 Contrôler l'effet de nouveauté :

Dans les études futures, on pourrait essayer de démêler l'effet RA de l'effet de nouveauté technologique. Une manière serait d'avoir un pré-test où les apprenants manipulent une application RA sur un sujet anodin, pour qu'ils se familiarisent, puis de réaliser l'apprentissage effectif sur la photosynthèse. Si l'effet positif persiste même après familiarisation, on gagne en assurance que ce n'est pas juste l'enthousiasme de la nouveauté. On pourrait aussi comparer la RA à une autre technologie immersive (par ex. Réalité Virtuelle) ou à du matériel concret (par ex. maquette physique de feuille) pour situer la RA parmi les outils disponibles en termes de rapport efficacité/engagement.

8.2.6 Exploration de la RA seule et de différentes combinaisons:

Il serait instructif de tester une condition RA seule (sans support texte/vidéo accompagnant) pour évaluer jusqu'où une application RA autonome peut enseigner un concept. À l'inverse, on pourrait examiner un dispositif Texte + Vidéo + RA tous combinés, bien que cela risque de saturer l'attention. Tester d'autres technologies voisines comme la réalité virtuelle (VR) serait pertinent : par exemple comparer RA vs VR vs vidéo, pour voir si l'immersion totale de la VR apporte un bénéfice supplémentaire ou si la RA, plus légère, suffit.

8.2.7 Élargissement à d'autres contenus et disciplines :

Pour consolider l'usage de la RA en éducation, il faudrait reproduire ce type d'étude sur divers contenus. Par exemple, tester un module RA en histoire (reconstruction 3D d'un événement) vs un documentaire vidéo vs un texte historique. Ou en mathématiques pour visualiser des surfaces géométriques vs cours traditionnel. Cela permettrait de voir si l'effet sur la compréhension et la charge cognitive est universel ou dépend de la nature du savoir. Il est possible que la RA soit plus bénéfique en sciences naturelles et ingénierie que dans d'autres domaines, ce qui mériterait confirmation.

8.2.8 Études longitudinales :

Il serait intéressant de suivre les apprenants sur le long terme au-delà d'un mois. Est-ce que l'avantage des groupes RA se maintient après 6 mois ? 1 an ? Et surtout, est-ce que ces étudiants réutilisent plus volontiers leurs connaissances (transfert) dans d'autres contextes ? Une recherche longitudinale pourrait nécessiter un processus d'apprentissage échelonné sur une période de six mois, ponctué par plusieurs évaluations de rétention à des intervalles réguliers, afin d'observer les variations des différences entre les groupes. On pourrait aussi étudier l'effet sur les performances académiques concrètes (comme les notes finales du cours, par exemple), afin de confirmer que l'impact observé en laboratoire se répercute en réussite éducativemesurable.

8.2.9 Qualité de l'intégration pédagogique de la RA :

Nos résultats suggèrent que la RA fonctionne bien lorsqu'elle est judicieusement intégrée. Des recherches qualitatives complémentaires pourraient interroger les étudiants et enseignants sur leur ressenti, les difficultés rencontrées, les suggestions d'amélioration de l'implémentation. Par exemple, mener des entretiens avec des participants des groupes RA pour comprendre comment ils ont perçu l'expérience, ce qui les a aidés ou gênés. Le recueil de ces retours permettrait d'élaborer des guidelines pédagogiques pour l'usage de la RA (par ex. comment introduire l'outil, quelle guidance fournir, combien de temps l'utiliser..etc).

8.2.10 Comparaison coût-bénéfice :

Il serait pertinent d'évaluer le rapport coût/efficacité de l'intégration de la RA. Même si la RA améliore les résultats, il faut considérer le temps et les ressources nécessaires (développement de contenu AR, formation des enseignants, équipement). Des études futures pourraient examiner des aspects pratiques comme le temps supplémentaire éventuellement requis en classe, les problèmes techniques rencontrés et leur fréquence, etc., afin de guider les décideurs éducatifs sur l'ampleur de l'investissement à consentir. Pour cela, on pourrait par exemple comparer deux classes sur un chapitre entier, l'une utilisant RA et l'autre non, et

regarder non seulement les notes mais aussi le temps total d'enseignement requis, le feedback des professeursetc

En conclusion de ces recommandations, il apparaît que la RA est un outil suffisamment prometteur pour mériter des investigations approfondies. Malgré les limites de cette première étude exploratoire, les perspectives ouvertes – tant au niveau de la recherche (compréhension fine des mécanismes cognitifs en jeu) qu'au niveau pratique (intégration de la RA dans les curricula) sont nombreuses et stimulantes.

Conclusion

L'objectif de cette étude était d'examiner l'effet d'une technologie éducative innovante, à savoir la réalité augmentée (RA), sur le fardeau cognitif des apprenants et l'efficacité de leur apprentissage. Afin de réaliser cela, nous avons instauré une expérimentation minutieuse centrée sur un concept scientifique complexe, la photosynthèse, en mettant en parallèle quatre méthodes d'enseignement : support texte seul, vidéo seule, texte enrichi par de la RA, vidéo enrichie par de la RA. Cette pluralité, combinée à des mesures de performance immédiate, de rétention à un mois et de charge cognitive perçue (via l'indice multidimensionnel NASA-TLX), nous a permis de cerner comment l'intégration de la RA influence le processus d'apprentissage.

Premièrement, il est apparu que l'intégration de la RA a amélioré les performances d'apprentissage par rapport aux supports traditionnels. Ainsi, les supports enrichis par la RA, notamment la vidéo, ont permis des performances supérieures, y compris par rapport aux vidéos classiques, soulignant ainsi son potentiel à renforcer même des supports textuels.

Deuxièmement, l'avantage apporté par la RA ne s'est pas estompé avec le temps. Un mois après l'apprentissage, les groupes ayant utilisé la RA ont mieux retenu les connaissances acquises par rapport aux autres groupes. Les groupes traditionnels (texte ou vidéo seuls) ont permis de noter un oubli au fil des semaines suggérant ainsi que la RA contribue à consolider les acquis.

Enfin, loin de provoquer une surcharge cognitive, la RA a en réalité réduit la charge mentale perçue pendant l'apprentissage par rapport aux supports conventionnels. Les participants ont fourni moins d'effort intellectuel lorsqu'ils utilisaient des éléments visuels interactifs en réalité augmentée par rapport à ceux qui se limitaient à un texte simple ou même à une vidéo sans interaction. Il convient de souligner que le groupe qui s'est basé exclusivement sur le texte, sans support visuel, a déclaré avoir éprouvé une plus grande charge cognitive. Par contre, le groupe qui a eu recours à la vidéo et à la RA a estimé que la tâche d'apprentissage avait exigé moins d'efforts cognitifs. En d'autres termes, dans notre étude, la RA n'a pas ajouté de la complexité. Utilisée de manière judicieuse elle a, en fait, allégé l'effort mental nécessaire pour comprendre et retenir le processus de photosynthèse. La triple convergence de résultats (meilleure performance, meilleure rétention, moindre charge perçue), constitue un indicateur fort du potentiel pédagogique de la réalité augmentée.

Sur le plan pédagogique, notre étude a permis de démontrer comment la réalité augmentée peut améliorer l'enseignement de phénomènes complexes. La RA réduit l'écart entre ce qui est conceptuel et ce qui est tangible. Les apprenants ne se contentent plus d'être de simples lecteurs ou spectateurs. Les résultats suggèrent également qu'une approche multimodale combinant texte et RA peut rivaliser avec (voire surpasser) les supports vidéo conventionnels. Cela représente un message fort pour la pratique éducative, car il indique qu'il est possible d'améliorer un cours traditionnel sans nécessairement recourir à des moyens audiovisuels lourds et coûteux.

Notre dispositif expérimental, fondé sur quatre groupes comparatifs, a permis d'identifier des effets subtils que d'autres designs auraient pu manquer. De plus, l'intégration d'une mesure de rétention à distance d'un mois renforce considérablement la portée de nos conclusions. Là où de nombreuses études se bornent à des tests immédiats, nous avons pu vérifier la durabilité des apprentissages induits par la RA. De plus, l'approche longitudinale confère une crédibilité supplémentaire aux bénéfices observés, en confirmant que ceux-ci ne sont pas éphémères. L'approche qui combine l'usage d'indicateurs de performance objectifs (scores aux QCM) et d'évaluations subjectives (questionnaire NASA-TLX) se révèle bénéfique. Elle nous a permis de confronter les données et de comprendre plus précisément l'expérience vécue par les apprenants, et pas uniquement leurs résultats bruts. L'association entre les résultats et les impressions vécues met en évidence la solidité de notre système, et l'usage du NASA-TLX dans un cadre éducatif constitue en soi une contribution méthodologique considérable.

Pour ce qui concerne la recherche scientifique, des reproductions utilisant des échantillons plus étendus et variés permettront de confirmer la solidité des résultats. Des études dans des contextes différents – par exemple auprès de public plus jeune ou en formation continue – permettront de vérifier si les bénéfices de la RA se maintiennent à d'autres âges et dans d'autres environnements. Il serait aussi judicieux d'examiner la relation coût-efficacité de son implémentation sur le long terme. Ces perspectives ouvrent des pistes concrètes pour la recherche et pour une intégration réfléchie de la RA en contexte éducatif.

Pour les politiques publiques et les décideurs éducatifs, à l'heure où le numérique éducatif occupe le devant de la scène, la tentation est grande de succomber aux effets de mode ou aux solutions 'miracles'. Nos résultats offrent un message à la fois encourageant et prudent. Encourageant, car certaines technologies judicieusement élaborées – en l'occurrence, la réalité augmentée – ont le potentiel d'améliorer véritablement la qualité des apprentissages. Prudent, car leur performance est conditionnée par divers facteurs: un contenu sur mesure, une mise en œuvre soigneusement planifiée et une accessibilité assurée. Il faudra accorder une attention spéciale à l'égalité des opportunités, afin d'éviter que la mise en place de la RA n'accentue davantage l'écart numérique entre les établissements scolaires bien équipés et les autres.

Ceci dit, il est essentiel de reconnaître les limites pour interpréter les conclusions de manière équilibrée. La portée des résultats reste limitée, notamment en raison de l'homogénéité de l'échantillon et d'un possible effet de nouveauté lié au caractère encore peu courant de la RA en contexte éducatif. Si tel est le cas, qu'advient-il lorsque cette technologie sera banalisée en classe? Il faudra veiller à distinguer ce qui relève d'un véritable apport pédagogique de ce qui tient de l'engouement passager pour la nouveauté. Par ailleurs, nous n'avons pas exploré en détail les différences individuelles, certains apprenants ayant pu mieux tirer parti de la RA que d'autres (par exemple en fonction de leurs préférences d'apprentissage, de leurs aptitudes spatiales, ou de leur aisance à utiliser des outils numériques).

Pour résumer, ce travail offre une perspective sur l'apport de la réalité augmentée dans le domaine éducatif. À travers la photosynthèse, nous avons prouvé que, lorsqu'elle est bien exploitée, la RA peut transcender sa simple perception « d'accessoire » pour devenir un instrument pédagogique performant. Elle a permis de diminuer la charge cognitive là où on pouvait craindre qu'elle l'alourdisse, et de renforcer la mémorisation là où souvent l'oubli l'emporte. Ces résultats, bien que préliminaires, s'inscrivent dans une tendance plus large, celle d'une pédagogie qui cherche à mettre le numérique au service de l'humain, et non l'inverse. Ce mémoire met en évidence des signes tangibles d'espoir concernant sa valeur ajoutée. Il encourage de poursuivre l'investigation, d'améliorer les méthodes, de former les acteurs sur le terrain, pour que cette technologie s'insère idéalement dans le cadre éducatif. En définitive, voir un élève manipuler en réalité augmentée un concept autrefois abstrait, le voir s'émerveiller de comprendre ce qui lui semblait obscur, c'est apercevoir ce que pourrait être l'éducation de demain : un espace où les outils numériques, loin de surcharger l'esprit, l'émancipent des barrières de la complexité, et où apprendre devient un parcours plus accessible, stimulant et durable. Ainsi s'achève notre étude, sur la conviction qu'avec discernement et créativité, la technologie augmentée peut contribuer à façonner un avenir éducatif enrichi, où la réussite cognitive et le plaisir d'apprendre vont de pair.

Bibliographie

Livres

SWELLER, John, AYRES, Paul et KALYUGA, Slava. (2011). Cognitive Load Theory. New York: Springer.

Articles

ABDINEJAD, Maryam et al., 2021. Developing a Simple and Cost-Effective Markerless Augmented Reality Tool for Chemistry Education. Journal of Chemical Education. Vol. 98, no 5, pp. 1783-1788. DOI [10.1021/acs.jchemed.1c00173](https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.1c00173).

AEducaAR, Anatomical Education in Augmented Reality: A Pilot Experience of an Innovative Educational Tool Combining AR Technology and 3D Printing, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/3/1024> [consulté le 3 décembre 2024].

Augmented Reality in Science Laboratories: Investigating High School Students' Navigation Patterns and Their Effects on Learning Performance. DOI [10.1177/07356331211038764](https://doi.org/10.1177/07356331211038764).

A Personalization Effect in Multimedia Learning: Students Learn Better When Words Are in Conversational Style Rather Than Formal Style, [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/232481296_A_Personalization_Effect_in_Multimedia_Learning_Students_Learn_Better_When_Words_Are_in_Conversational_Style_Rather_Than_Formal_Style [consulté le 15 décembre 2024].

AKÇAYIR, Murat et al., 2016. Augmented reality in science laboratories: The effects of augmented reality on university students' laboratory skills and attitudes toward science laboratories. Computers in Human Behavior. Vol. 57, pp. 334-342. DOI [10.1016/j.chb.2015.12.054](https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.12.054).

AKÇAYIR, Murat et AKÇAYIR, Gökçe, 2017. Advantages and challenges associated with augmented reality for education: A systematic review of the literature. Educational Research Review. Vol. 20, pp. 1-11. DOI [10.1016/j.edurev.2016.11.002](https://doi.org/10.1016/j.edurev.2016.11.002).

ALALWAN, Nasser et al., 2020. Challenges and Prospects of Virtual Reality and Augmented Reality Utilization among Primary School Teachers: A Developing Country Perspective. Studies in Educational Evaluation. Vol. 66, p. 100876. DOI [10.1016/j.steduc.2020.100876](https://doi.org/10.1016/j.steduc.2020.100876).

ALSHANSKAIA, Evgeniia I. et al., 2024. Heart rate response to cognitive load as a marker of depression and increased anxiety. Frontiers in Psychiatry. Vol. 15. DOI [10.3389/fpsy.2024.1355846](https://doi.org/10.3389/fpsy.2024.1355846).

A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays, 2024ResearchGate [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/231514051_A_Taxonomy_of_Mixed_Reality_Visual_Displays [consulté le 4 octobre 2024].

AZUMA, Ronald T. A Survey of Augmented Reality.

<https://www.cs.unc.edu/~azuma/ARpresence.pdf>.

BACCA, Jorge et al., 2015. Mobile Augmented Reality in Vocational Education and Training. *Procedia Computer Science*. Vol. 75, pp. 49-58. DOI [10.1016/j.procs.2015.12.203](https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.203).

BADILLA-QUINTANA, María Graciela, SEPULVEDA-VALENZUELA, Eileen et SALAZAR ARIAS, Margarita, 2020. Augmented Reality as a Sustainable Technology to Improve Academic Achievement in Students with and without Special Educational Needs. *Sustainability*. Vol. 12, no 19, p. 8116. DOI [10.3390/su12198116](https://doi.org/10.3390/su12198116).

BRUSTIO, Paolo Riccardo et al., 2017. Age-related decrements in dual-task performance: Comparison of different mobility and cognitive tasks. A cross sectional study. LÓPEZ LLUCH, Guillermo (éd.), *PLOS ONE*. Vol. 12, no 7, p. e0181698. DOI [10.1371/journal.pone.0181698](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181698).

CEVAHIR, Hakan, ÖZDEMİR, Muzaffer et BATURAY, Meltem Huri, 2022. The Effect of Animation-Based Worked Examples Supported with Augmented Reality on the Academic Achievement, Attitude and Motivation of Students towards Learning Programming. *Participatory Educational Research*. Vol. 9, no 3, pp. 226-247. DOI [10.17275/per.22.63.9.3](https://doi.org/10.17275/per.22.63.9.3).

Cognitive Constraints on Multimedia Learning: When Presenting More Material Results in Less Understanding, ResearchGate [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/publication/232530555_Cognitive_Constraints_on_Multimedia_Learning_When_Presenting_More_Material_Results_in_Less_Understanding [consulté le 14 décembre 2024].

Education in the Digital Age: Learning Experience in Virtual and Mixed Realities - Devon Allcoat, Tim Hatchard, Freeha Azmat, Kim Stansfield, Derrick Watson, Adrian von Mühlénen, 2021, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0735633120985120> [consulté le 07 janvier 2025].

Effects of Incorporating AR into a Board Game on Learning Outcomes and Emotions in Health Education, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/11/1752> [consulté le 24 décembre 2024].

JANET, Éric, Olivier Le Bohec, Cédric Hidrio, Comment présenter l'information dans les documents numériques éducatifs ? Une approche de psychologie cognitive Dans *Document numérique*, 2003/1 (Vol. 7), pages 25 à 38 Éditions Lavoisier

GARZÓN, Juan et ACEVEDO, Juan, 2019. Meta-analysis of the impact of Augmented Reality on students' learning gains. *Educational Research Review*. Vol. 27, pp. 244-260. DOI [10.1016/j.edurev.2019.04.001](https://doi.org/10.1016/j.edurev.2019.04.001).

GECU-PARMAKSIZ, Zeynep et DELIALIOGLU, Omer, 2019. Augmented reality-based virtual manipulatives versus physical manipulatives for teaching geometric shapes to preschool children. *British Journal of Educational Technology*. Vol. 50, no 6, pp. 3376-3390. DOI [10.1111/bjet.12740](https://doi.org/10.1111/bjet.12740).

HAILE, Tegegne Tesfaye et KANG, Mincheol, 2020. Mobile Augmented Reality in Electronic Commerce: Investigating User Perception and Purchase Intent Amongst Educated Young Adults. *Sustainability*. Vol. 12, no 21, p. 9185. DOI [10.3390/su12219185](https://doi.org/10.3390/su12219185).

KIM, Jeongah et SHIM, Jaekwoun, 2022. Development of an AR-Based AI Education App for Non-Majors. *IEEE Access*. Vol. 10, pp. 14149-14156. DOI [10.1109/ACCESS.2022.3145355](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3145355).

LAMPROPOULOS, Georgios, 2024. Teaching and learning natural sciences using augmented reality in preschool and primary education: A literature review. *Advances in Mobile Learning Educational Research*. Vol. 4, no 1, pp. 1021-1037. DOI [10.25082/AMLER.2024.01.013](https://doi.org/10.25082/AMLER.2024.01.013).

LOW, Darren Yi Sern, POH, Phaik Eong et TANG, Siah Ying, 2022. Assessing the impact of augmented reality application on students' learning motivation in chemical engineering. *Education for Chemical Engineers*. Vol. 39, pp. 31-43. DOI [10.1016/j.ece.2022.02.004](https://doi.org/10.1016/j.ece.2022.02.004).

MAYER, Richard. E., 2024. The Past, Present, and Future of the Cognitive Theory of Multimedia Learning. *Educational Psychology Review*. Vol. 36, no 1, p. 8. DOI [10.1007/s10648-023-09842-1](https://doi.org/10.1007/s10648-023-09842-1).

MAYER, Richard. E. et JOHNSON, Cheryl I., 2008. Revising the redundancy principle in multimedia learning. *Journal of Educational Psychology*. Vol. 100, no 2, pp. 380-386. DOI [10.1037/0022-0663.100.2.380](https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.2.380).

Measuring treatment effects on dual-task performance: a framework for research and clinical practice, 2024ResearchGate. DOI [10.3389/fnhum.2015.00225](https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00225).

MOLINA, Camilo A. et al., 2021. A cadaveric precision and accuracy analysis of augmented reality-mediated percutaneous pedicle implant insertion. *Journal of Neurosurgery. Spine*. Vol. 34, no 2, pp. 316-324. DOI [10.3171/2020.6.SPINE20370](https://doi.org/10.3171/2020.6.SPINE20370).

MOLINA, Camilo A. et al., 2019. Augmented reality-assisted pedicle screw insertion: a cadaveric proof-of-concept study. *Journal of Neurosurgery. Spine*. Vol. 31, no 1, pp. 139-146. DOI [10.3171/2018.12.SPINE181142](https://doi.org/10.3171/2018.12.SPINE181142).

Student perceptions of virtual reality use in higher education, [en ligne]. Disponible à l'adresse

https://www.researchgate.net/publication/332232459_Student_perceptions_of_virtual_reality_use_in_higher_education [consulté le 13 décembre 2024].

ORÚS, Carlos, IBÁÑEZ-SÁNCHEZ, Sergio et FLAVIÁN, Carlos, 2021. Enhancing the customer experience with virtual and augmented reality: The impact of content and device type. *International Journal of Hospitality Management*. Vol. 98, p. 103019. DOI [10.1016/j.ijhm.2021.103019](https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2021.103019).

PAAS, Fred et al., 2003. Cognitive Load Measurement as a Means to Advance Cognitive Load Theory. *Educational Psychologist*. Vol. 38, no 1, pp. 63-71. DOI [10.1207/S15326985EP3801_8](https://doi.org/10.1207/S15326985EP3801_8).

Principles for Reducing Extraneous Processing in Multimedia Learning, ResearchGate [en ligne]. Disponible à l'adresse :

https://www.researchgate.net/publication/359588527_Principles_for_Reducing_Extraneous_Processing_in_Multimedia_Learning [consulté le 16 décembre 2024].

PAMPLONA, Fabricio, 2022. Analyse post-hoc : Processus et types de tests. Mind the Graph Blog [en ligne]. 28 juillet 2022. Disponible à l'adresse : <https://mindthegraph.com/blog/fr/analyse-post-hoc/> [consulté le 30 mai 2025].

REINACHER, Peter Christoph et al., 2023. Usage of augmented reality for interventional neuraxial procedures: A phantom-based study. *European Journal of Anaesthesiology | EJA*. Vol. 40, no 2, p. 121. DOI [10.1097/EJA.0000000000001755](https://doi.org/10.1097/EJA.0000000000001755).

STONE, Nelson N. et al., 2022. Remote surgical education using synthetic models combined with an augmented reality headset. *Surgery Open Science*. Vol. 10, pp. 27-33. DOI [10.1016/j.sopen.2022.06.004](https://doi.org/10.1016/j.sopen.2022.06.004).

TIAN, Nai-Feng et XU, Hua-Zi, 2009. Image-guided pedicle screw insertion accuracy: a meta-analysis. *International Orthopaedics*. Vol. 33, no 4, pp. 895-903. DOI [10.1007/s00264-009-0792-3](https://doi.org/10.1007/s00264-009-0792-3).

VILCHEZ, Anthony Wilder Arias, SOTO, Tomas Silvestre Marcelo Lloclla et ATUNCAR, Giancarlo Sanchez, 2024. Mobile Application with Augmented Reality Applying the MESOVA Methodology to Improve the Learning of Primary School Students in an Educational Center. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. Vol. 15, no 5. DOI [10.14569/IJACSA.2024.0150559](https://doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0150559).

YANG, L. et al., 2015. Psychometric properties of dual-task balance assessments for older adults: A systematic review. *Maturitas*. Vol. 80, no 4, pp. 359-369. DOI [10.1016/j.maturitas.2015.01.001](https://doi.org/10.1016/j.maturitas.2015.01.001).

Web

Augmented Reality Market Size, Share & Trends Report 2030, [en ligne]. Disponible à l'adresse : <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/augmented-reality-market> [consulté le 2 novembre 2024].

L, Bastien, 2019. Samsung invente des lentilles de contact à réalité augmentée avec caméra. REALITE-VIRTUELLE.COM [en ligne]. 30 juillet 2019. Disponible à l'adresse : <https://www.realite-virtuelle.com/samsung-lentilles-contact-ar-camera/> [consulté le 16 décembre 2024].

COLLA, Sofia, 2017. Ces lentilles de contact intelligentes transforment vos yeux en appareil photo. WE DEMAÎN [en ligne]. 7 avril 2017. Disponible à l'adresse : https://www.wedemain.fr/inventer/ces-lentilles-de-contact-intelligentes-transforment-vos-yeux-en-appareil-photo_a2625-html/ [consulté le 16 décembre 2024]

Dual-coding theory, 2024Wikipedia [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Dual-coding_theory&oldid=1254899468 [consulté le 13 décembre 2024]. Page Version ID: 1254899468

Théorie cognitive de l'apprentissage multimédia selon Mayer (2014) | Download Scientific Diagram, [en ligne]. Disponible à l'adresse : https://www.researchgate.net/figure/Theorie-cognitive-de-lapprentissage-multimedia-selon-Mayer-2014_fig1_331158493 [consulté le 2 janvier 2025].

Annexes

Annexe A – Formulaire de consentement des participants

Avant de participer à l'expérience, chaque volontaire a rempli un formulaire de consentement en ligne. <https://impartial-lake-7df.notion.site/1bcff2628d2280f898a0e78926169cf2?pvs=105>

Formulaire

Nous recherchons des participants (étudiants universitaires et non universitaires) pour une étude sur l'apprentissage de la photosynthèse à l'aide de différents supports (vidéo, texte, application de réalité augmentée). Cette étude comprend une session initiale d'environ 30 minutes et une session de suivi un mois plus tard afin d'évaluer la rétention des connaissances sur le long terme.

- **Nom***: _____
- **Prenom***: _____
- **Âge***: _____
- **Statut***:
 - a. Etudiant
 - b. Non Étudiant
- **Discipline ou domaine d'étude/travail (facultatif)**: _____
- **Email***: _____
- **Telephone***: _____
- **Votre niveau en anglais (1 = très basique, 10 = très avancé)*** :

- **Sur une échelle de 1 à 5, comment évalueriez-vous votre niveau de connaissance sur la photosynthèse ? (1 = très basique, 10 = très avancé)*** :

- **Quel(s) système(s) d'exploitation mobile utilisez-vous ?*:**
 - iOS
 - Android

- **Disponibilité dans 1 mois pour le suivi*:**
 - Oui
 - Non

- J'accepte que mes données soient collectées dans les conditions décrites ci-dessus et je consens à participer à cette étude.

Annexe B – Support Texte

Introduction to Photosynthesis

Photosynthesis is the process by which plants, algae, and some bacteria convert solar energy into chemical energy in the form of carbohydrates. These organisms, known as **autotrophs**, support nearly all life on Earth by serving as the base of food chains and producing the oxygen necessary for aerobic life. Without photosynthesis, there would be no oxygen-rich atmosphere, and heterotrophs (organisms that rely on consuming organic matter) would have no direct energy source.

Photosynthesis is a biochemical process that primarily takes place in plants and algae, but some prokaryotes, like cyanobacteria, also carry it out. This process is essential to maintaining the Earth's ecosystems, as it forms the foundation of the food chain. Over millions of years, photosynthesis has played a significant role in shaping the Earth's atmosphere and supporting biodiversity.

Where Photosynthesis Happens

1. The raw materials for photosynthesis are carbon dioxide and water. Water, which enters a leaf by way of leaf veins, and carbon dioxide, which enters by way of the stomata, diffuse into the cells and enter the chloroplasts.
2. Chloroplasts have two major parts.
3. The grana are made up of thylakoids, membranous disks that contain photosynthetic pigments such as chlorophylls a and b. These pigments absorb solar energy.
4. The stroma, as indicated in this micrograph, is a fluid-filled space where carbon dioxide is enzymatically reduced to carbohydrate.

Photosynthesis occurs primarily in the **chloroplasts** of plant leaf cells, particularly in the **mesophyll tissue**. Each chloroplast contains an inner fluid-filled region called the **stroma**, and stacked membrane-bound sacs called **thylakoids** that contain chlorophyll pigments. Chloroplasts are highly specialized organelles that contain **photosynthetic pigments**, enzymes, and proteins necessary for capturing light energy and converting it into chemical energy.

- **CO₂ enters** through stomata on the leaf surface.
- **Water is absorbed** from the roots and transported through veins.
- **Light is absorbed** by pigments in the thylakoid membranes.
- The **grana**, which are stacks of thylakoids, contain molecules that initiate light absorption.

Within the chloroplast, photosynthesis takes place in two major phases: the **light-dependent reactions**, which require sunlight and occur in the thylakoid membranes, and the **light-independent reactions** (Calvin cycle), which occur in the stroma.

The Two Main Stages of Photosynthesis

1. Light-Dependent Reactions

These reactions take place in the **thylakoid membranes** and require sunlight. When pigments absorb solar energy, water molecules are split, releasing **oxygen**, and the energy is used to generate **ATP** and **NADPH**.

- **Input:** Light and water
- **Output:** Oxygen (O₂), ATP, NADPH
- **Key Process:** Photolysis (splitting of water molecules) provides electrons needed for the transport chain.

The light-dependent reactions convert solar energy into **chemical energy** that fuels the second phase of photosynthesis. This phase involves **electron transport chains** that pass electrons through a series of proteins embedded in the thylakoid membrane, generating ATP via chemiosmosis.

2. Calvin Cycle (Light-Independent Reactions)

These reactions occur in the **stroma** and do not require light directly. The ATP and NADPH produced by the light reactions are used to fix **carbon dioxide** into **glucose precursors**.

- **Phases:**
 1. **CO₂ fixation** – The enzyme **RuBisCO** facilitates the attachment of CO₂ to RuBP.
 2. **CO₂ reduction** – ATP and NADPH are used to produce G3P, the primary product of the Calvin cycle.
 3. **Regeneration of RuBP** – Some G3P molecules are recycled back into RuBP to continue the cycle.
- **Key output:** G3P (glyceraldehyde-3-phosphate), which is used to synthesize glucose, sucrose, cellulose, starch, and lipids.

The Calvin cycle is a **carbon fixation pathway** that transforms atmospheric CO₂ into organic molecules essential for plant metabolism and growth.

The Role of Pigments

Pigments like **chlorophyll a**, **chlorophyll b**, and **carotenoids** absorb different wavelengths of light. Green light is least absorbed, which is why leaves appear green.

- **Chlorophyll a** is the primary pigment responsible for capturing light energy.
- **Chlorophyll b** assists in expanding the range of light absorption.
- **Carotenoids** (yellow/orange pigments) help in light absorption and protect against photo-damage.

The pigments inside the thylakoid membranes form **photosystems** (PSI and PSII), which drive the light-dependent reactions.

Gas Exchange and Stomata

- **Stomata** are small pores that allow CO₂ in and O₂ out.
 - Controlled by **guard cells** to reduce water loss.
 - When stomata are open, plants can uptake CO₂ but risk **transpiration** (water loss).
 - In dry conditions, stomata close to conserve water, but this can limit CO₂ uptake.
-

Alternative Pathways for Photosynthesis

Some plants have developed **C4 and CAM photosynthesis** as adaptations to hot and dry environments.

- **C3 plants** use the Calvin cycle directly, but they are less efficient under high temperatures.
- **C4 plants** separate carbon fixation and the Calvin cycle into different cells, reducing **photorespiration**.
- **CAM plants** take in CO₂ at night to minimize water loss and store it for daytime use.

These adaptations allow plants to thrive in extreme climates where water is scarce.

Photosynthesis vs Cellular Respiration

Photosynthesis and cellular respiration are **opposite processes**:

Photosynthesis	Cellular Respiration
Occurs in chloroplasts	Occurs in mitochondria
Uses light energy	Releases energy as ATP

Stores energy in glucose Breaks down glucose

Releases O₂ Uses O₂

Uses CO₂ Releases CO₂

Both processes rely on electron transport chains and ATP synthesis, but they serve **opposing functions** in the energy cycle.

- let, indigo, blue, and red light, but reflect green.
 - Pigment complexes in **Photosystem I** and **Photosystem II** absorb sunlight to initiate the light reactions.
 - In the **noncyclic electron pathway**:
 - Electrons are energized in PSII and move through an **electron transport chain**.
 - Electrons lost in PSII are replaced by those from **H₂O** (which is split, releasing **O₂**).
 - The **H⁺ gradient** formed helps produce **ATP**.
 - Electrons energized in PSI reduce **NADP⁺ to NADPH**.
 - In the **cyclic electron pathway**:
 - Electrons energized by PSI travel a looped path through an electron transport chain to generate **ATP**.
 - The electrons return to PSI instead of reducing NADP⁺.
 - The **H⁺ gradient across the thylakoid membrane** is used by **ATP synthase** to produce ATP.
-

8.3 – Plants as Carbon Dioxide Fixers

- ATP and NADPH generated in the light reactions move into the **stroma**.
 - In the **Calvin cycle**:
 - **CO₂ is fixed** to a 5-carbon molecule (**RuBP**) by **RuBP carboxylase**.
 - The resulting 6-carbon molecule splits into two 3-carbon molecules (**3PG**).
 - ATP and NADPH are used to reduce 3PG into **G3P**.
 - **G3P** is used to synthesize carbohydrates such as **glucose** and other organic molecules.
-

8.4 – Alternative Pathways for Photosynthesis

- **C3 Plants**:
 - First molecule after CO₂ fixation is a 3-carbon compound (3PG).
 - These plants can undergo **photorespiration** when **O₂** binds to RuBP carboxylase instead of CO₂.
- **C4 Plants**:
 - CO₂ fixation and the Calvin cycle occur in separate cells:

- **Mesophyll cells** fix CO₂.
 - **Bundle sheath cells** carry out the Calvin cycle.
 - This spatial separation prevents photorespiration, especially under **hot and dry** conditions.
 - **CAM Plants:**
 - Fix CO₂ **at night** (when stomata are open) and store it.
 - Release CO₂ to the Calvin cycle during the **day**.
 - This is a **temporal separation** strategy to minimize water loss.
-

8.5 – Photosynthesis vs Cellular Respiration

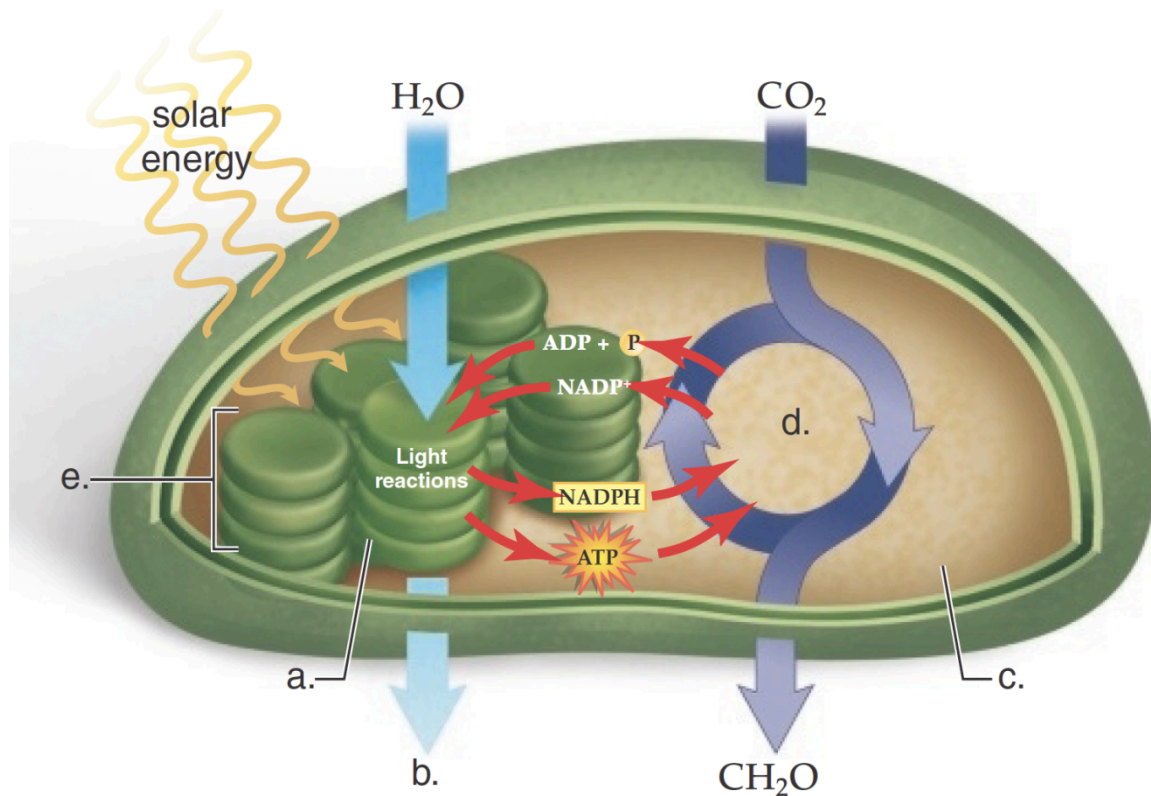
- **Similarities:**
 - Both use **electron transport chains** and produce ATP.
- **Photosynthesis:**
 - Reduces CO₂ into carbohydrates.
 - Oxidizes H₂O to release O₂.
- **Cellular Respiration:**
 - Oxidizes carbohydrates to release energy (ATP).
 - Releases CO₂ and **reduces O₂** to form water.

**Annexe C –
Extrait des réponses au formulaire en ligne (informations sensibles
masquées)**

Discipline	Age	Disponibilit é suivi :	Email	GDP R	Syst ème d'ex ploita tion	Statut	Submissio n time	Télép hone	Niveau en Anglai s
Anglais	20	Oui	***@* **.co m	Yes	Andro id	Étudiant	May 6, 2025 11:39 PM	***** ****	9
Biologie	23	Oui	***@* **.co m	Yes	iOS	Étudiant	May 3, 2025 1:28 PM	***** ****	7
N/A	19	Oui	***@* **.co m	Yes	Andro id	Étudiant	April 26, 2025 5:09 PM	***** ****	8
Anglais	26	Oui	***@* **.co m	Yes	iOS	Étudiant	May 3, 2025 2:26 PM	***** ****	6
Lycée	17	Oui	***@* **.co m	Yes	iOS	Étudiant	April 26, 2025 5:40 PM	***** ****	85
cinéma	32	Oui	***@* **.co m	Yes	Andro id	Non étudiant	April 26, 2025 7:35 PM	***** ****	4
Master en communi cation	25	Oui	***@* **.co m	Yes	Andro id	Étudiant	April 26, 2025 5:19 PM	***** ****	10
Infirmière	22	Oui	***@* **.co m	Yes	Andro id	Étudiant	April 26, 2025 5:19 PM	***** ****	3
Anglais	31	Oui	***@* **.co m	Yes	iOS	Non étudiant	May 2, 2025 2:28 PM	***** ****	9
Diététiqu e/Santé Publique	29	Oui	***@* **.co m	Yes	iOS	Non étudiant	April 26, 2025 5:26 PM	***** ****	6

Annexe D
Questionnaire à choix multiple (QCM)

1. Label each of the items in the diagram below:



2. The function of light reactions is to:

- a. obtain CO_2
- b. make carbohydrate
- c. convert light energy into a usable form of chemical energy
- d. regenerate RuBP

3. The Calvin cycle reactions:

- a. produce carbohydrate
- b. convert one form of chemical energy into a different form of chemical energy

- c. regenerate more RuBP
 - d. use the products of the light reactions
 - e. All of these are correct
-

8.2 – Plants as Solar Energy Converters

4. The final acceptor of electrons during the light reactions of the noncyclic electron pathway is:

- a. PS I
- b. PS II
- c. ATP
- d. NADP+
- e. water

5. The oxygen given off by photosynthesis comes from:

- a. H₂O
- b. CO₂
- c. glucose
- d. RuBP

6. The noncyclic electron pathway, but not the cyclic pathway, generates:

- a. 3PG
 - b. chlorophyll
 - c. ATP
 - d. NADPH
-

8.3 – Plants as Carbon Dioxide Fixers

7. The ATP and NADPH from the light reactions are used to:

- a. split water
- b. cause RuBP carboxylase to fix CO₂
- c. re-form the photosystems
- d. cause electrons to move along their pathways
- e. convert 3PG to G3P

8. In the absence of sunlight, plants are not able to engage in the Calvin cycle due to a lack of:

- a. ATP
 - b. oxygen
 - c. NADPH
 - d. Both a and c are correct
-

8.4 – Alternative Pathways for Photosynthesis

9. CAM photosynthesis:

- a. is the same as C₄ photosynthesis
- b. is an adaptation to cold environments in the Southern Hemisphere
- c. is prevalent in desert plants that close their stomata during the day
- d. occurs in plants that live in marshy areas
- e. stands for “chloroplasts and mitochondria”

10. C₄ photosynthesis:

- a. is the same as C₃ photosynthesis, because it takes place in chloroplasts
- b. occurs in plants whose bundle sheath cells contain chloroplasts
- c. takes place in plants such as wheat, rice, and oats
- d. is an advantage when the weather is hot and dry
- e. Both b and d are correct

 8.5 – Photosynthesis vs Cellular Respiration

11. Cellular respiration and photosynthesis both:

- a. use oxygen
- b. produce carbon dioxide
- c. contain an electron transport chain
- d. occur in the chloroplast

12. Which of the following does not occur in photosynthesis?

- a. reduction of CO₂
- b. oxidation of water
- c. reduction of oxygen
- d. All of these are correct

Annexe E
Tableau récapitulatif des performances expérimentales

Participant	Group	Immediate QCM (/16)	Retention QCM (/16)	NASA-TLX (0–100)
Mahak	Text only	10	8	65
Younes	Text only	9	7	73
Abdallah	Text only	11	9	55
Priya	Text only	7	5	78
Ali	Text only	6	4	80
Mia	Video only	8	7	72
Louise	Video only	10	7	70
Samar	Video only	11	8	60
Zoé	Video only	11	9	52
Hugo	Video only	13	11	45
Lamia	Text+AR	12	10	55
Manon	Text+AR	13	11	45
Élodie	Text+AR	11	8	65
Martin	Text+AR	11	10	60
Emeline	Text+AR	13	11	50
Alex	Video+AR	14	12	45
Sarah	Video+AR	14	12	50
Reda	Video+AR	12	10	61
Imene	Video+AR	12	10	56
Ouarda	Video+AR	15	13	38

Résumé

Ce mémoire explore l'impact de la Réalité Augmentée (RA) sur la charge cognitive des apprenants lors de l'apprentissage de la photosynthèse. Une expérimentation contrôlée a été menée auprès de 20 participants répartis dans quatre conditions (texte, vidéo, texte + RA, vidéo + RA). Les résultats montrent que l'usage de la RA réduit la charge cognitive perçue et améliore significativement la performance d'apprentissage immédiate et différée. L'étude met en évidence les avantages pédagogiques de la RA pour représenter des concepts abstraits, renforcer l'engagement et améliorer la rétention des connaissances. Ces résultats suggèrent que la RA peut enrichir l'expérience éducative et faciliter l'apprentissage de contenus complexes.

Mots-clés : Réalité augmentée, charge cognitive, apprentissage multimodal, photosynthèse, technologie éducative, théorie cognitive de l'apprentissage multimédia, expérience utilisateur, évaluation pédagogique