



**HAL**  
open science

# Anatomy 2020. Outil d'interaction avec le corps pour l'apprentissage actif de l'anatomie

Pierre-Yves Rabattu

► **To cite this version:**

Pierre-Yves Rabattu. Anatomy 2020. Outil d'interaction avec le corps pour l'apprentissage actif de l'anatomie. Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALM038 . tel-04061190

**HAL Id: tel-04061190**

**<https://theses.hal.science/tel-04061190>**

Submitted on 6 Apr 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

**DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES**

École doctorale : MSTII - Mathématiques, Sciences et technologies de l'information, Informatique

Spécialité : Mathématiques et Informatique

Unité de recherche : Laboratoire Jean Kuntzmann

**Anatomy 2020. Outil d'interaction avec le corps pour l'apprentissage actif de l'anatomie**

**Anatomy 2020. Body-involved interactive tools for active learning of anatomy**

Présentée par :

**Pierre-Yves RABATTU**

Direction de thèse :

**Olivier PALOMBI**  
UJF

Directeur de thèse

Rapporteurs :

**THOMAS BESSEDE**

Professeur des Univ. - Praticien hosp., UNIVERSITE PARIS- SACLAY

**GUILLAUME CAPTIER**

Professeur des Univ. - Praticien hosp., UNIVERSITE DE MONTPELLIER

Thèse soutenue publiquement le **2 décembre 2022**, devant le jury composé de :

**THOMAS BESSEDE**

Professeur des Univ. - Praticien hosp., UNIVERSITE PARIS- SACLAY

Rapporteur

**GUILLAUME CAPTIER**

Professeur des Univ. - Praticien hosp., UNIVERSITE DE MONTPELLIER

Rapporteur

**JOCELYNE TROCCAZ**

Directeur de recherche, CNRS DELEGATION ALPES

Examinatrice Présidente du Jury

**PHILIPPE DESSUS**

Professeur des Universités, UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Examineur

Invités :

**OLIVIER PALOMBI**

Professeur des Univ. - Praticien hosp., UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

**NADY EL HOYEK**

Maitre de conférences, UNIVERSITE LYON 1 - CLAUDE BERNARD



## RESUME EN FRANÇAIS

### Introduction

L'apprentissage de l'anatomie est fondamental pour les étudiants en médecine, mais il reste complexe. Il nécessite l'acquisition d'une quantité de savoir, de savoir-faire et de savoir-être. Cet apprentissage se faisait traditionnellement par des cours magistraux et des séances de dissection au laboratoire d'anatomie. La diminution du nombre d'heures d'enseignement, le côté « passif » pour les étudiants des cours magistraux et les difficultés logistiques et économiques d'accès aux pièces anatomiques ont conduit les enseignants à développer de nouvelles méthodes pédagogiques et à s'aider des nouvelles technologies, notamment numériques, pour faciliter cet enseignement.

Une nouvelle méthode pédagogique, appelée apprentissage incarné découle de la psychologie cognitive et fait référence aux pensées (cognition), aux sentiments (émotions) et aux comportements (corps), basés sur les expériences sensorielles et sur les positions corporelles. Il est particulièrement intéressant dans l'apprentissage de l'anatomie car l'objet de l'apprentissage est également l'objet d'étude.

Notre objectif principal était d'étudier l'impact pédagogique de l'incarnation sur l'apprentissage de l'anatomie. Nos objectifs secondaires étaient d'explorer les facteurs influençant et influencés par un tel apprentissage, ainsi que de réfléchir à son inclusion dans les parcours pédagogiques existants.

### Matériel et méthode

Nous avons conduit deux études à haut niveau d'incarnation, et développé un outil pédagogique numérique interactif pour l'apprentissage de l'anatomie.

Une première étude écologique sur des étudiants de STAPS (Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives) de Lyon, a étudié l'impact de l'intégration d'un apprentissage incarné sur l'apprentissage de l'anatomie fonctionnelle. Puis nous avons développé un outil numérique interactif d'apprentissage actif de l'anatomie tridimensionnelle, et mené une étude randomisée, contrôlée, sur son impact pédagogique et les facteurs l'influencent, sur un groupe d'étudiants en 2<sup>ème</sup> année de médecine à l'université de Grenoble-Alpes.

### Résultats

Notre première étude n'a pas montré d'impact pédagogique significatif de l'incarnation à court et moyen terme, mais un impact pédagogique significatif de l'apprentissage incarné sur l'anatomie fonctionnelle. De plus, cette modalité pédagogique était simple à mettre en place et peu coûteuse au sein d'un enseignement. Notre seconde étude a mis en évidence une amélioration de l'apprentissage incarné, mais de manière non-significative, sur l'anatomie tridimensionnelle. Les étudiants ayant le moins de compétences visuo-spatiales ont mieux progressé, grâce à cet outil numérique, mais de manière non significative. La satisfaction globale était en revanche élevée, faisant de cet outil numérique

un outil envié par les étudiants, et donc probablement stimulant pour l'apprentissage, malgré une charge mentale élevée.

### **Discussion**

Notre travail permet de mettre en évidence une amélioration de l'impact pédagogique à long terme de l'incarnation sur l'anatomie fonctionnelle, ainsi qu'une grande satisfaction des étudiants quant à l'utilisation de ces outils. La charge mentale est à prendre en considération dans le développement de ces nouvelles méthodes pédagogiques, pour éviter toute surcharge cognitive. Les nouvelles technologies, notamment en 3D numériques, semblent apporter un gain d'apprentissage aux étudiants ayant les moins bonnes compétences visuo-spatiales.

Notre travail possède quelques limites, notamment méthodologiques.

### **Conclusion**

L'apprentissage incarné semble bénéfique sur l'apprentissage de l'anatomie, notamment fonctionnelle, et sur la rétention à long terme. Il s'agit d'une modalité bien adoptée par les étudiants, stimulant leur motivation et leur intérêt au travail. Il convient de poursuivre les recherches et l'évaluation de ces outils pédagogiques pour les intégrer parfaitement au parcours pédagogique holistique d'un programme anatomique complet.

## **MOTS CLES**

Apprentissage incarné ; Enseignement de l'anatomie générale ; Enseignement médical ; Trois dimensions ; Anatomie numérique ; Enseignement interactif

## RESUME EN ANGLAIS

### Introduction

Learning anatomy is fundamental for medical students but remains complex. It requires acquisition of a lot of knowledge, skills and attitudes. Such learning has traditionally been accomplished through lectures, and dissection courses undertaken in the anatomy laboratory. Decreased teaching hours, the “passive” nature of lectures and the logistical and economic difficulties of access to anatomical specimens have led educators to develop new teaching methods and to use novel technologies, particularly digital technology, to facilitate training.

A new pedagogical method called embodied learning, derived from cognitive psychology, refers to a learning process that involves not only thoughts (cognition), but also feelings (emotions) and behaviours (body), based on sensory experiences and body positions. It is of particular interest when learning anatomy since the object of learning is also the object of study.

The primary aim of this work was to evaluate the impact of an embodied educational method on anatomy learning. The secondary aims were to explore the factors influencing and being influenced by embodied learning, and to consider its integration into existing medical education pathways.

### Materials and methods

Two studies were conducted, both characterised by high levels of embodiment, and we developed an interactive digital pedagogical tool for learning anatomy. The initial study, of ecological design, investigated the impact of integrating embodied learning into a kinesiology curriculum at the University of Lyon for postgraduate students enrolled in a STAPS (Science and Techniques of Physical Activities and Sport) degree. Subsequently, after the development of a digital, interactive, 3-dimensional anatomy learning software program, a randomized controlled study further examining the pedagogical impact of embodiment and the factors influencing it, was conducted on a group of second-year medical students learning anatomy at the medical faculty of the Grenoble Alps University.

### Results

The first study failed to show any significant pedagogical impact of embodiment in the short and medium term, however there was a significant impact in the long term on functional anatomy. This modality of learning proved simple to implement within a pre-existing curriculum and was inexpensive. Our second study showed that embodied learning improved, but not significantly, on three-dimensional anatomy, and that students with the least visual-spatial skills progressed better, but not significantly, with this digital tool. Nevertheless, students with the weakest visuospatial skills showed a trend to better progression with the use of this tool, even though this finding failed to reach statistical significance. Overall student

satisfaction was high, despite the high mental load, suggesting that this educational tool is sought-after by students and has a promising role in stimulating learning.

### **Discussion**

Our work describes a positive pedagogical impact of embodiment learning in the longer term on functional anatomy, and a high level of user satisfaction. Mental load should be taken into consideration in the development of new teaching methods, to avoid cognitive overload. The novel technology, especially the digital 3D features, also seemed to offer an advantage to those students with the weakest visuospatial abilities.

Some limitations exist in this research, mainly arising from the methodology.

### **Conclusion**

Embodied learning appears to be beneficial for anatomy learning, especially for functional anatomy and long-term retention of knowledge. It is well accepted by students, stimulating their motivation for learning and curiosity for the subject matter. Further research and evaluation of these educational tools is recommended to ensure their full integration into a holistic teaching pathway of a comprehensive anatomy curriculum.

## **KEY WORDS**

Embodied learning; Gross anatomy education; Medical education ; Three dimensional ; Digital anatomy ; Interactive education

# 1 Table des matières

2	INTRODUCTION .....	6
3	ETAT DE L'ART .....	8
3.1	Pédagogie .....	8
3.2	Méthodes Pédagogiques .....	13
3.3	Pédagogie en Anatomie .....	16
3.3.1	Généralités .....	16
3.3.2	Nouvelles technologies .....	20
3.3.3	Apprentissage incarné .....	23
4	EXPERIMENTATIONS.....	34
4.1	Etude « STAPS ».....	35
4.2	Développement d'une application pédagogique.....	37
4.3	Etude « Médecine » .....	46
5	CONTRIBUTIONS.....	53
5.1	Etude « STAPS ».....	53
5.2	Etude « Médecine » .....	55
5.3	DISCUSSION .....	66
6	CONCLUSIONS .....	73
7	SOURCES.....	76
8	ANNEXES.....	82
8.1	Exemple du test de Rotation mentale MR-Test (phase pré-test). .....	82
8.2	Exemple d'un QCM d'anatomie à 5 propositions, avec image extraite du logiciel.....	83
8.3	Questionnaire d'évaluation de la charge mentale, NASA-TLX. ....	84
8.4	Questionnaire d'évaluation de l'outil numérique (première page), AttrakDiff. ....	85
8.5	Questionnaire de satisfaction (phase de post-test). ....	86
8.6	Avis favorable du comité d'éthique local.....	87
8.7	Document d'information et de consentement éclairé. ....	88
8.8	Liste des éléments de communication et de publications .....	91

## 2 INTRODUCTION

Ce travail a pour objectif d'étudier les bénéfices et les limites de l'apprentissage incarné en anatomie, au travers de deux études empiriques, et de discuter de la place de cet enseignement au sein d'un cursus pédagogique en anatomie.

L'apprentissage de l'anatomie est fondamental pour les étudiants en médecine en vue de leur future pratique clinique. L'anatomie est, pour les futurs médecins quels qu'ils soient et pour tout professionnel de santé, l'alphabet de la médecine (Cabanis, 2020). Son apprentissage permet de développer l'intelligence et le raisonnement, plutôt que la mémoire (Fredon et al., 2021). Il comprend l'apprentissage d'un nouveau vocabulaire (anatomie descriptive), de la morphologie des structures anatomiques et de leurs rapports (anatomie spatiale) et bien sûr du mouvement de celles-ci (anatomie fonctionnelle).

Le volume horaire de l'enseignement de l'anatomie dans les facultés de médecine a diminué en raison du développement de connaissances accrues dans de nouvelles disciplines. Les étudiants souffrent de cette diminution des heures d'enseignement (Triepels et al., 2018).

Les enseignants d'anatomie ont dû, et doivent encore aujourd'hui, s'adapter en utilisant des méthodes et des outils pédagogiques innovants, notamment numériques (Guimarães et al., 2017).

Ces nouvelles méthodes pédagogiques et ces nouveaux outils technologiques méritent une évaluation solide pour analyser précisément leurs intérêts. Il est nécessaire de fournir aux étudiants des moyens pédagogiques non seulement innovants, mais qui aient fait leurs

preuves, autant en termes d'impact pédagogique, qu'en termes de charge mentale, de viabilité financière, logistique et stratégique.

Ce travail de recherche sur la pédagogie en anatomie a pour vocation d'explorer, de développer et d'évaluer une nouvelle méthode pédagogique qu'est l'apprentissage incarné. Ce dernier regroupe l'ensemble des processus cognitifs liés à l'interaction du corps avec l'environnement. Il s'agit donc de l'aide à la mémorisation par les gestes.

Nous faisons l'hypothèse qu'un apprentissage incarné de l'anatomie a un impact pédagogique positif sur les étudiants.

Nous ferons une étude bibliographique de l'état de l'art en pédagogie, en pédagogie anatomique et plus particulièrement dans le domaine de l'incarnation. Puis nous détaillerons nos expérimentations, au travers de deux études scientifiques et la création d'un outil pédagogique numérique et interactif innovant, et discuterons de nos résultats avec pour objectif d'explorer les bénéfices et les limites que peut avoir cette nouvelle méthode pédagogique. Nous alimenterons ensuite une discussion à la lumière de ces résultats en les comparant aux données de la littérature. Enfin, nous ouvrirons des perspectives pour les études futures, après une conclusion sur ce travail.

## **3 ETAT DE L'ART**

Ce chapitre présente un état de l'art de ce que sont les théories et les taxonomies en matière de pédagogie et de méthodes pédagogiques. Puis nous nous intéresserons à la pédagogie de l'Anatomie, et consacrerons un chapitre à l'étude des résultats publiés de l'apprentissage incarné, et à ses effets sur la mémorisation et les facteurs l'influençant que sont la charge mentale et les compétences visuo-spatiales.

### **3.1 Pédagogie**

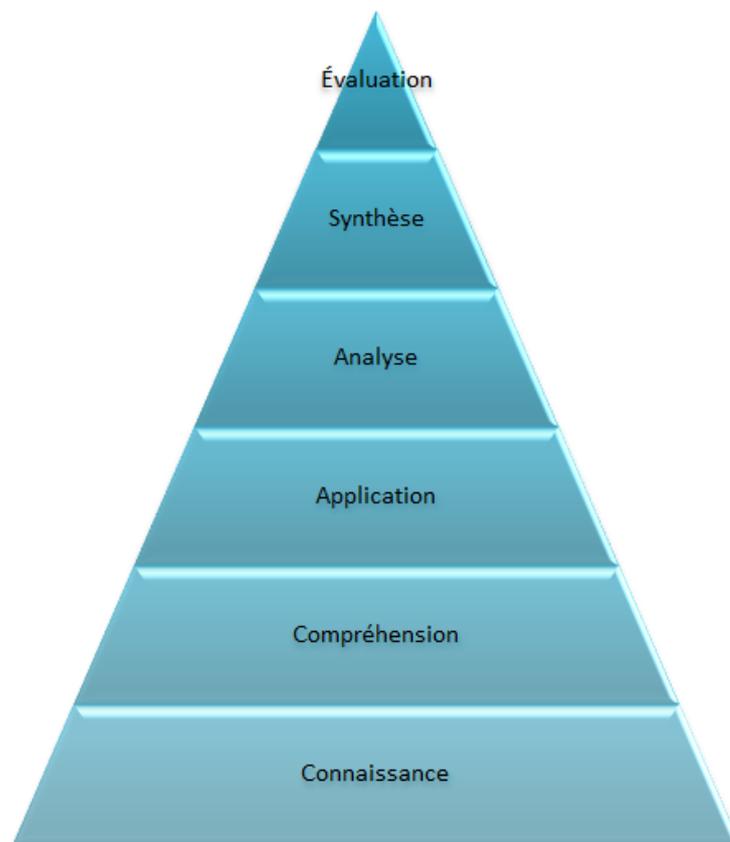
La pédagogie était initialement définie comme la direction ou l'éducation des enfants. Dans la Grèce antique, le pédagogue était l'esclave qui accompagnait les enfants à l'école, portait leurs affaires et les aidait pour les devoirs. La pédagogie devint progressivement l'art d'enseigner ou la science de l'éducation. Elle regroupe les méthodes pour transmettre un savoir (connaissances), un savoir-faire (compétences) et un savoir-être (attitudes).

Depuis quelques décennies, les paradigmes pédagogiques changent. Nous sommes passés de l'enseignement vers l'apprentissage, c'est-à-dire à une approche moins centrée sur l'enseignant, et plus centrée sur l'étudiant. Les années précédentes mettaient l'accent sur l'acquisition des connaissances, et nous sommes aujourd'hui passés dans une logique d'acquisition de compétences et de savoir-être.

Bloom (Bloom, 1956) avait classé les tâches d'apprentissage en 3 domaines : le domaine psychomoteur (manipulation, habiletés physiques), le domaine affectif (attitudes et émotions

générées par l'apprentissage) et le domaine cognitif (connaissance et compréhension des concepts et des idées).

Pour ce qui en est du domaine cognitif, qui correspond aux connaissances et aux compétences à acquérir, Bloom avait classé les objectifs d'apprentissage en six catégories **(Figure 1)** : la connaissance, la compréhension, l'application, l'analyse, la synthèse et l'évaluation, sous la forme d'une pyramide. Pour atteindre un niveau supérieur, les bases devaient être acquises.



Taxonomie de Benjamin S. Bloom de 1956

**Figure 1** : Taxonomie de Bloom.

Des verbes d'action ont été associés à chacun des six niveaux de cette taxonomie

(Figure 2). Ce tableau permet de repérer que l'on se situe dans le domaine cognitif, le plus élaboré selon Bloom.

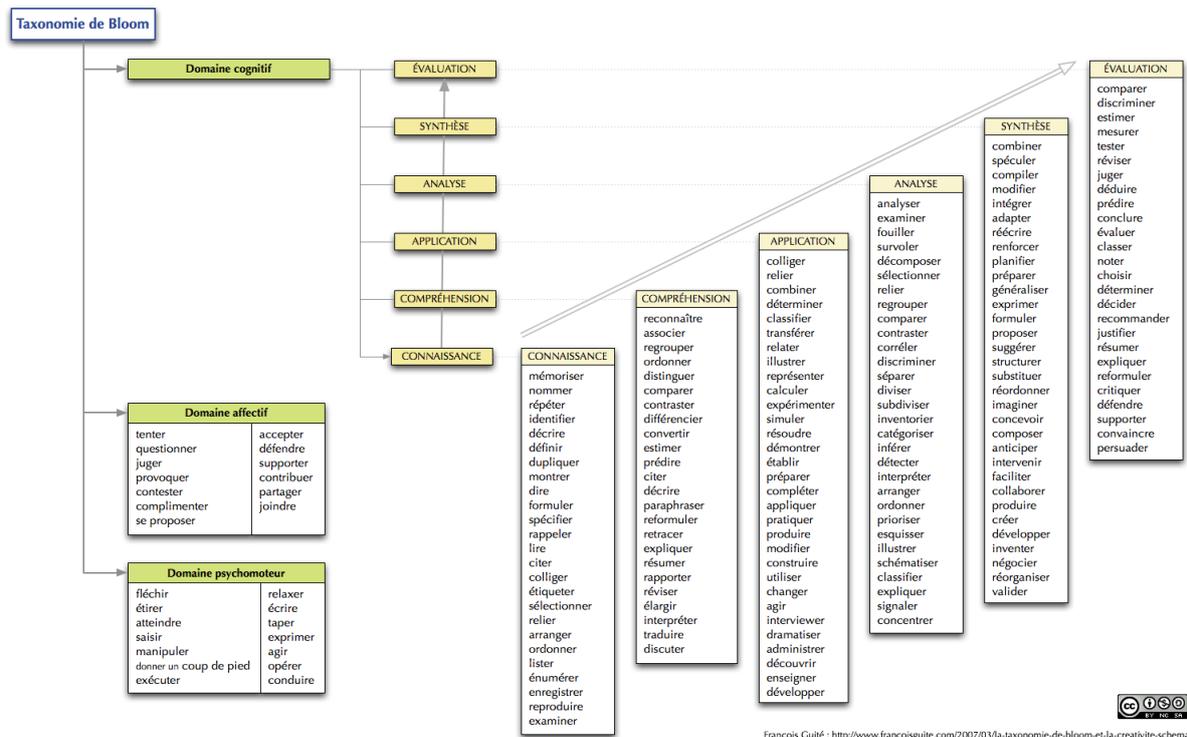
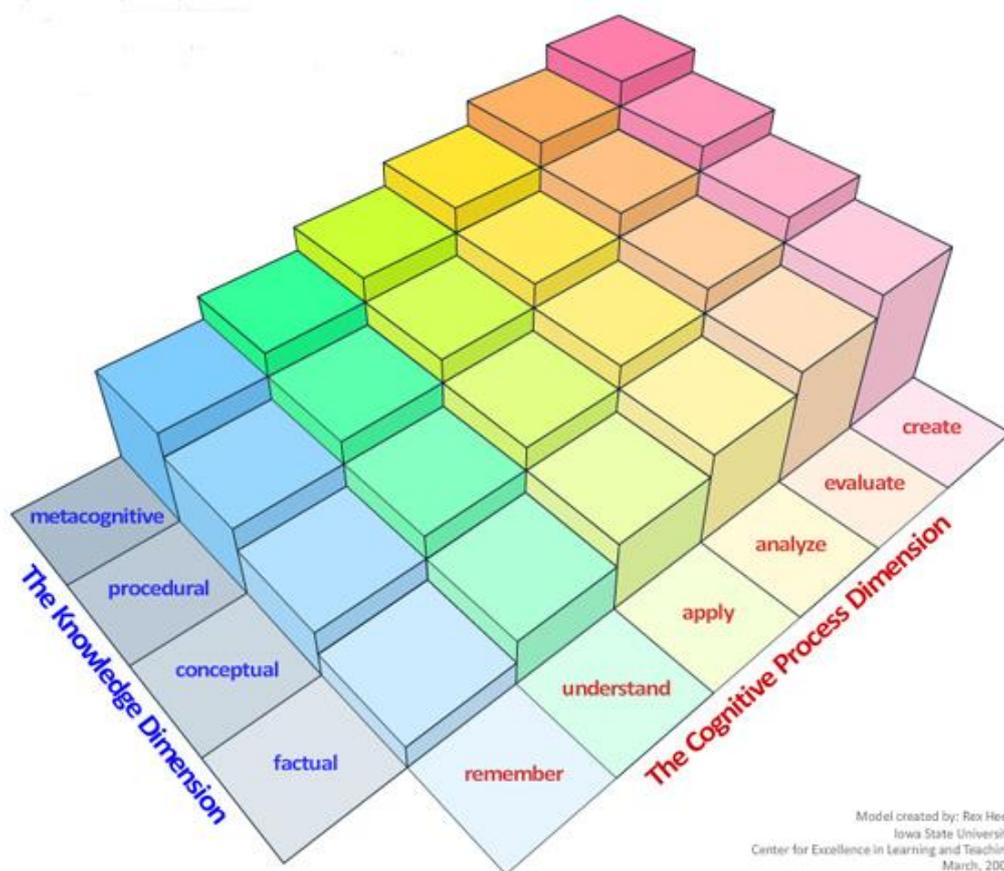


Figure 2 : Verbes d'action associés aux différents niveaux des domaines d'apprentissage selon Bloom.

Cette taxonomie a été révisée en 2001 par Anderson et Krathwohl (Anderson and Krathwohl, 2001) pour devenir une taxonomie bidimensionnelle. Anderson et Krathwohl ont redéfini six processus cognitifs (mémoriser, comprendre, appliquer, analyser, évaluer, créer) qu'ils ont mis en relation avec les quatre types de connaissances (factuelle, conceptuelle, procédurale, métacognitive).

Les connaissances factuelles sont les informations de terminologie. Les connaissances conceptuelles mettent en relation des faits. Les connaissances procédurales sont une série d'étapes, comme par exemple de poser un diagnostic en médecine, ou de résoudre un algorithme en mathématiques. Enfin, les connaissances métacognitives englobent les connaissances des stratégies cognitives, la connaissance des tâches cognitives et la connaissance de soi en relation avec un apprentissage.

Voici une représentation de la révision d'Anderson et Krathwohl réalisée en 2009 par l'université de l'Iowa (**Figure 3**).



**Figure 3** : La taxonomie Anderson et Krathwohl selon ("Iowa State University," n.d.).

Les objectifs pédagogiques du domaine affectif sont ceux qui « *mettent l'accent sur une tonalité affective, sur une émotion, ou sur un certain degré d'acceptation ou de rejet* ». Ils peuvent être classés selon cinq niveaux, même si Bloom et Krathwohl ont reconnu eux-mêmes qu'il était difficile de les classer en différents niveaux (Gingras, 1975).

- Premier niveau : La réception ou l'attention portée à divers phénomènes ou stimuli.
- Deuxième niveau : La réponse consciente, active et délibérée à un phénomène.
- Troisième niveau : La valorisation de quelque chose, d'un phénomène ou d'un comportement.
- Quatrième niveau : L'organisation des valeurs intériorisées par l'étudiant.
- Cinquième niveau : La caractérisation par une valeur ou un ensemble de valeurs.

Cette taxonomie comprend les capacités d'un individu et ses possibilités de répondre à une tâche demandée par une réponse avec un comportement adéquat. Des exemples d'objectifs du domaine affectif débuteraient par « donner son opinion », « partager », « accueillir » ou « discuter ».

Enfin, le domaine psychomoteur peut être classé, d'après Cooper (Cooper, 1973), en six sous-catégories : les mouvements réflexes, les mouvements fondamentaux, les capacités perceptives, les capacités physiques, les habiletés motrices et la communication gestuelle.

Ces différents domaines sont étudiés séparément, mais dans la réalité, ils s'articulent ensemble, à des degrés plus ou moins marqués.

## 3.2 Méthodes Pédagogiques

La classification des méthodes pédagogiques est complexe, non-consensuelle, et peut être faite sous plusieurs formes.

La classification traditionnelle regroupe cinq catégories :

- Les méthodes expositives où l'enseignant détenteur du savoir transmet à l'élève. Il s'agit par exemple des cours magistraux, avec une transmission de l'enseignant vers l'étudiant qui reste passif.
- Les méthodes démonstratives, où l'enseignant montre, fait faire et fait dire. Il s'agit par exemple d'un cours interactif où les étudiants sont interrogés et peuvent répondre.
- La méthode interrogative où l'enseignant fait « accoucher » des connaissances à l'étudiant en lui posant les bonnes questions (Découle de la maïeutique de Socrate). Il s'agit d'une méthode active où l'apprenant est interrogé et fournit lui-même un savoir, comme dans la classe inversée.
- La méthode de découverte, où l'étudiant chemine de manière active, guidé par l'enseignant, jusqu'à trouver les réponses, comme dans l'apprentissage par problèmes qui développe le raisonnement clinique et le professionnalisme.
- La méthode expérientielle où l'enseignant guide l'étudiant qui produit un savoir qui n'existait pas, comme dans l'apprentissage par les pairs, où l'étudiant est enseignant et développe des compétences de communicateur, de travail en équipe et forge son identité professionnelle.

On évolue donc depuis les méthodes traditionnelles dans lesquelles l'enseignement était basé, pour l'apprenant, sur les contraintes, mais qui suscitait l'ennui, vers les méthodes actives ou coopératives. Ces dernières, plus attrayantes, suscitent l'intérêt et éveillent l'apprenant en suscitant sa curiosité.

Les nouvelles méthodes pédagogiques qui se sont développées dans les dernières décennies se doivent d'être adaptées aux attentes pédagogiques des étudiants, en fonction de leur niveau, de leur cursus, de leur spécialité, de leurs difficultés.

L'accent a également été mis sur des moyens pédagogiques où l'étudiant est de plus en plus acteur dans son apprentissage. Il s'agit de pédagogie active comme dans la classe inversée ou l'apprentissage par problèmes, mais également de pédagogie coopérative, où l'étudiant est encouragé à travailler en groupe, comme dans l'apprentissage par équipe ou l'enseignement réciproque entre pairs.

Le modèle de « classe inversée » est un enseignement où l'étudiant étudie le cours à domicile avant le cours magistral dispensé par l'enseignant qui répond aux questions (Bates et al., 2017; Lin et al., 2022). Cette méthode permettrait d'améliorer la créativité et la pensée critique (Al-Zahrani, 2015), une approche plus structurée de l'apprentissage (Baepler et al., 2014), et une augmentation significative, fréquemment signalée, des performances des étudiants (Gillois et al., 2015).

L'apprentissage par problèmes (Barrows and Mitchell, 1975) suscite de plus en plus d'intérêt. Bien qu'il ait été adopté par l'Université de McMaster au Canada en 1969 (Rooney et al., 1983), il a mis plusieurs décennies à parvenir au sein des cursus pédagogiques

européens. Il permet un apprentissage actif des étudiants à partir d'un problème clinique réel ou fictif. Il sert deux objectifs : rendre les connaissances plus pertinentes et récupérables, et favoriser le développement d'un raisonnement spécifique (Nandi et al., 2000).

L'apprentissage en équipe s'est développé initialement dans le domaine du commerce dans les années 1970, puis s'est étendu à l'éducation médicale dans les années 1990 (Michaelsen et al., 1997), et enfin à l'anatomie dans les années 2000 (Nieder et al., 2005). Il est fondé sur la constitution de petits groupes de travail, qui peuvent bénéficier d'un enseignement actif, ou de séances de dissection en groupe (Huitt et al., 2015), et éventuellement combinés, et qui favorisent le futur travail en équipe des étudiants.

L'enseignement entre pairs pendant lesquels des étudiants, qui sont des « tuteurs pairs », prodiguent l'enseignement à d'autres étudiants. Cet enseignement existe depuis plusieurs siècles, promu par le philosophe romain, Lucius Annaeus Seneca (4 av. J.-C. - 65 apr. J.-C.) : "*Qui Docet Discet*", où "Ceux qui enseignent apprennent". Plus récemment s'est développé l'enseignement réciproque par les pairs, où les étudiants alternent le rôle d'étudiants et d'enseignants (Evans and Cuffe, 2009). Par ce biais, les étudiants peuvent augmenter leur compréhension du contenu du cours, mais également développer des compétences de communication, de travail d'équipe, de leadership, de confiance et de respect des pairs (Krych et al., 2005).

On retrouve également les programmes d'études intégrées (Klement et al., 2011), l'apprentissage inter-professionnel (Hamilton et al., 2008).

## **3.3 Pédagogie en Anatomie**

### **3.3.1 Généralités**

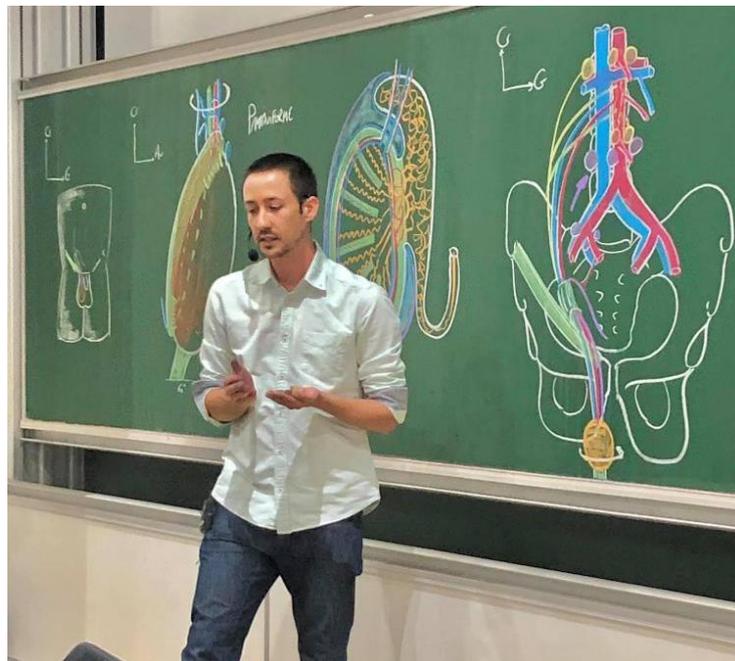
L'apprentissage de l'anatomie comprend plusieurs types d'apprentissage, qu'ils soient du domaine cognitif (connaissances), du domaine psychomoteur (compétences : pour la dissection par exemple), ou du domaine affectif (Evans et al., 2018), par l'apprentissage d'un savoir-être (identité professionnelle, rapport à la mort) et d'un savoir-vivre ensemble (travail collaboratif, en équipe, communication). Tout enseignement d'anatomie doit permettre à l'étudiant de développer des capacités d'adaptation des connaissances anatomiques acquises à la pratique clinique auprès des patients et de leur imagerie (Singh et al., 2015). Il est, de plus, prouvé que l'apprentissage de l'anatomie doit être cliniquement pertinent afin de stimuler la motivation des étudiants (Smith and Mathias, 2011).

L'enseignement en Anatomie a suivi peu ou prou l'évolution de l'enseignement en général. Il a été d'une part nécessaire d'adapter les cours aux nouveaux paradigmes imposés par la réduction du volume horaire des cours d'anatomie, et d'autre part de s'adapter à l'évolution des méthodes pédagogiques en utilisant les technologies innovantes au sein des enseignements.

Traditionnellement, cet enseignement comprenait deux méthodes pédagogiques complémentaires : des cours magistraux en amphithéâtre pour l'acquisition des connaissances et des séances de dissection au laboratoire d'anatomie pour l'acquisition des connaissances et des compétences.

Les cours magistraux sont décrits comme monotones, conduisant à un oubli rapide des connaissances et à une diminution rapide de l'intérêt (Chimalgi, 2019). Le cours sur diapos a fait preuve de son inefficacité, du fait de la passivité de l'enseignant qui lit et de l'étudiant qui écoute (Delmas, n.d.).

En anatomie, ces cours sont traditionnellement effectués par un professeur d'anatomie, à la craie sur tableau noir (**Figure 4**). L'enseignant et l'élève sont actifs car ils dessinent, et ces cours sont généralement plébiscités, mais ont des limites pédagogiques (Nandi et al., 2000; Pawlina and Lachman, 2004). L'évolution technologique transforme peu à peu cet enseignement en retransmissions audiovisuelles sur écran, dans l'amphithéâtre lui-même ou à distance. Progressivement, cet enseignement à la craie se métamorphose en un enseignement sur tablette tactile, où l'enseignant peut démontrer, comme dans le cours au tableau noir, comment se construisent les différentes structures sur une structure immuable.



**Figure 4** : Exemple d'un cours d'anatomie à la craie au tableau noir.

Les séances de dissection sont très appréciées des étudiants et constituent la référence en la matière depuis plus de 400 ans (**Figure 5**). Il s'agit d'un apprentissage de l'anatomie « haute-fidélité », actif, qui développe l'approche du patient et de la mort, et les compétences manuelles de l'étudiant. En revanche, elles consomment du temps, nécessitent une logistique importante et ont un coût élevé (Singh et al., 2015).

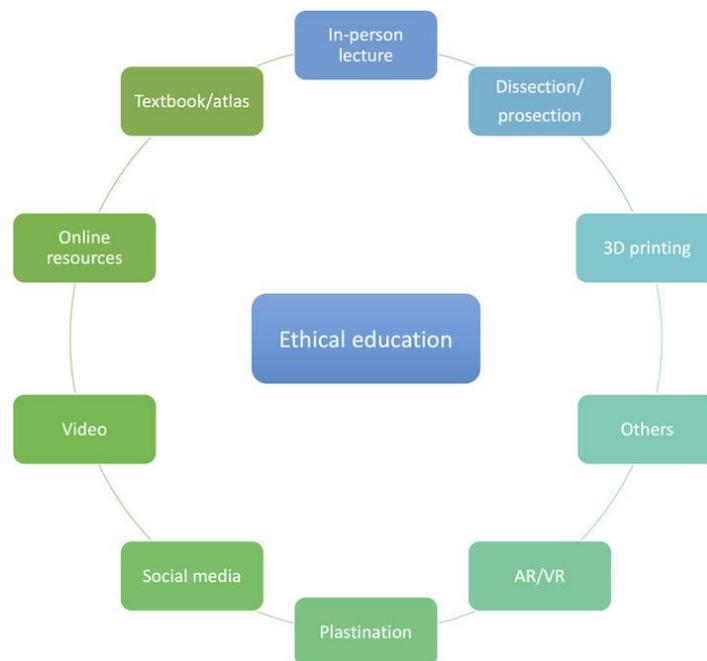
Une alternative en est la préparation anatomique (*prosection*), qui, à moindre coût, fait gagner du temps aux étudiants, est appréciée par ces derniers, et ne montre pas d'infériorité en terme d'impact pédagogique par rapport à la dissection (Yeager, 1996).



**Figure 5** : Une séance de dissection de l'épaule au Laboratoire d'Anatomie des Alpes Françaises (LADAF), de l'Université de Grenoble-Alpes.

Quoiqu'il en soit, l'enseignement d'anatomie doit être, comme probablement tout enseignement, intégré aux autres disciplines, constitué d'une multitude d'unités d'enseignement (Sugand et al., 2010) permettant un enseignement multimodal (Drake and Pawlina, 2014; Estai and Bunt, 2016; Sugand et al., 2010). Il doit comporter des méthodes pédagogiques utilisées en synergie et être adapté aux objectifs d'apprentissage, au niveau, à la spécialité et aux difficultés des étudiants.

La meilleure méthode pédagogique reste débattue dans la communauté des enseignants d'anatomie. Il est de plus en plus clair qu'il n'existe pas de méthode supérieure à une autre, mais que le meilleur apprentissage résulte d'un apprentissage multimodal (**Figure 6**).



**Figure 6** : Une approche multimodale de l'enseignement en anatomie, selon Iwanaga (Iwanaga et al., 2021).

Une des difficultés de l'étudiant est d'apprendre une anatomie tridimensionnelle à partir de supports bidimensionnels que sont le papier, les tableaux ou les écrans. Cela impose aux étudiants une gymnastique mentale qui complexifie la tâche et qui peut créer des inégalités entre eux, selon leurs compétences visuo-spatiales. Les séances de dissection ou de préparation anatomique (*prosection*), moyennant une logistique technique et financière élevée, permettent cela (Leung et al., 2006; Nwachukwu et al., 2015).

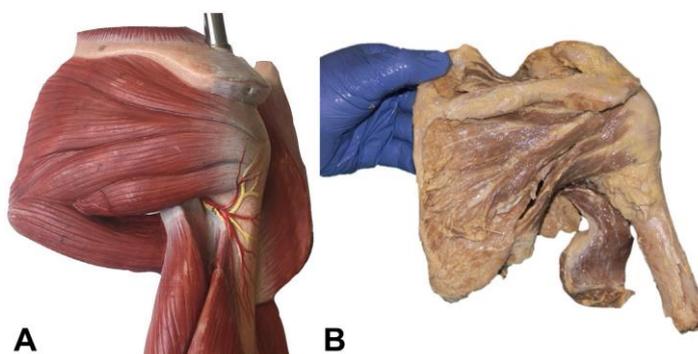
Le développement de nouvelles technologies semble à même d'apporter une réponse à cet apprentissage.

### 3.3.2 Nouvelles technologies

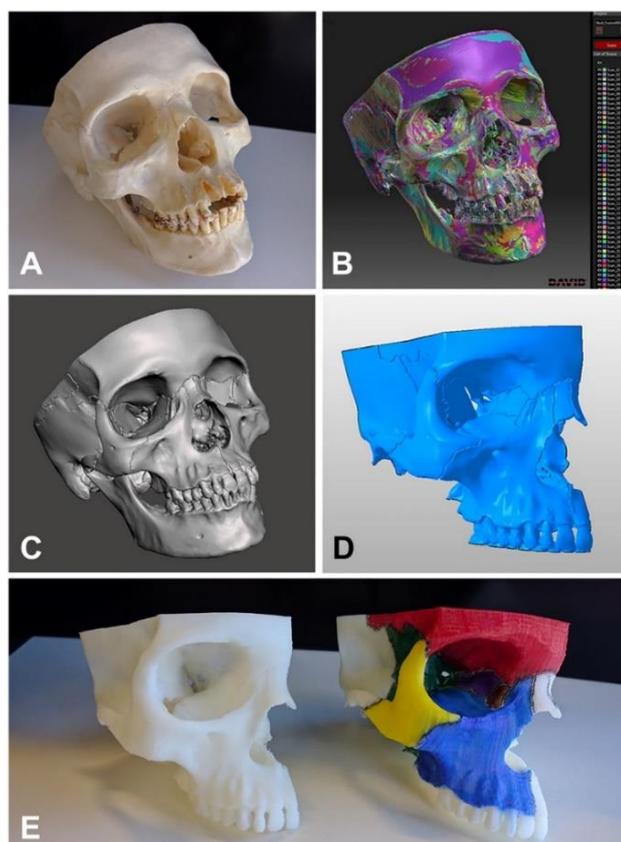
L'apprentissage de l'anatomie nécessite certaines compétences visuo-spatiales. Cette interaction entre les performances spatiales et les performances en anatomie est bien documentée (Garg et al., 2001; Guillot et al., 2007; Hegarty and Kriz, 2008; Langlois et al., 2017; Nguyen et al., 2012; Rochford, 1985). En outre, l'entraînement de la compétence spatiale (par exemple de la rotation mentale) des étudiants en kinésiologie par le biais d'outils multimédias 3D a un effet positif sur leurs résultats en anatomie (Hoyek et al., 2009).

L'avènement des nouvelles technologies est une aide aux étudiants pour leur faciliter cette gymnastique 2D-3D, grâce au développement d'un apprentissage à partir de structures en 3 dimensions, qu'elles soient numériques ou non.

Ces technologies innovantes peuvent être, par exemple, des modèles plastiques en trois dimensions ou des modèles imprimés en 3D (Backhouse et al., 2019) (**Figure 8**) que les étudiants peuvent manipuler et construire ou déconstruire leurs différents éléments (Mitrousias et al., 2020) (**Figure 7**)

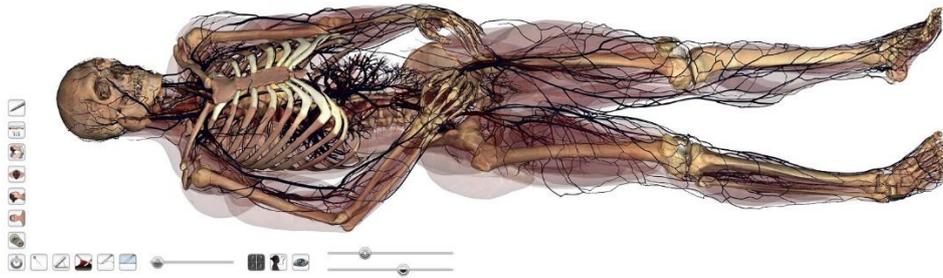


**Figure 7** : Utilisation d'un modèle 3D en plastique et d'un modèle cadavérique pour l'apprentissage de l'anatomie de l'épaule (Mitrousias et al., 2020).

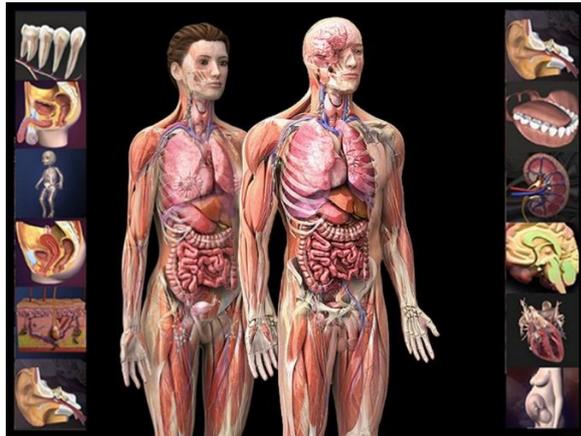


**Figure 8** : Les étapes du montage d'un crâne en plastique coloré dédié à l'apprentissage des os du crâne, à partir d'un crâne humain scanné (Backhouse et al., 2019).

Il peut s'agir de l'utilisation d'outils numériques, comme le visionnage de vidéos en 3D (Cui et al., 2017; Hoyek et al., 2014; Peterson and Mlynarczyk, 2016; Yammine and Violato, 2015) ou de l'utilisation de la réalité virtuelle (Weyhe et al., 2018) telle que Visible Human (Spitzer and Whitlock, 1998), Anatomage (Anatomage, Inc., Santa Clara, California) (**Figure 9**) (Baratz et al., 2019), BioDigital Human (Qualter et al., 2012) and Zygote Body ("Zygote Body 3D Anatomy Online Visualizer | Human Anatomy 3D," n.d.) (**Figure 10**), qui peut même permettre la dissection virtuelle (Darras et al., 2018).



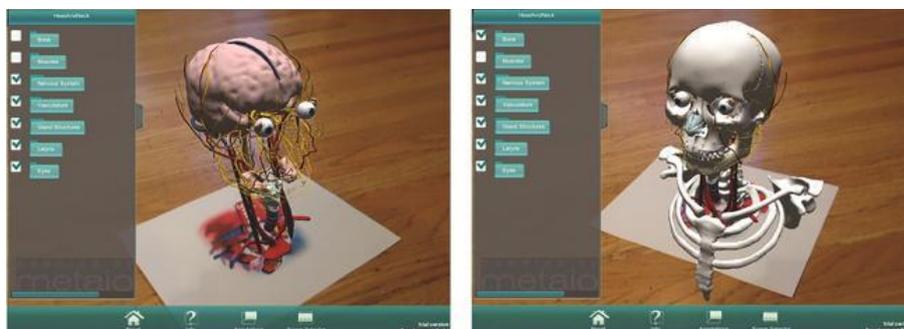
**Figure 9** : Image de réalité virtuelle Anatomage (Anatomage, Inc., Santa Clara, California).



**Figure 10** : Modèle anatomique d'un logiciel en réalité virtuelle ("Zygote Body 3D Anatomy Online Visualizer | Human Anatomy 3D," n.d.).

Enfin, il peut s'agir de la réalité augmentée (Jain et al., 2017; Kamphuis et al., 2014)

**(Figure 11).**



**Figure 11** : Outil de réalité augmentée de l'anatomie de l'extrémité céphalique, sur système mobile (Jain et al., 2017).

L'utilisation de l'imagerie médicale permet d'une part l'analyse de l'anatomie en coupe, et également l'analyse de la pathologie (Gunderman and Wilson, 2005) que ce soit en 2D ou en reconstruction 3D.

Ces outils, qu'ils soient numériques en 3D (Berney et al., 2015) ; plus simplement en plastique ou des pièces anatomiques, sont généralement appréciés par les étudiants.

Certaines de ces nouvelles technologies sont faciles à intégrer au sein d'un enseignement facultaire et ne nécessitent que peu de moyens logistiques, alors que d'autres sont onéreuses et nécessitent une logistique, technique et financière, complexe.

Il semble donc que ces outils pédagogiques innovants permettent une amélioration de l'apprentissage de l'anatomie spatiale.

Les étudiants peuvent néanmoins présenter des difficultés à l'apprentissage de l'anatomie fonctionnelle. Une méthode pédagogique intéressante permettrait une amélioration de la compréhension et de la mémorisation de l'anatomie fonctionnelle, au travers d'un apprentissage incarné de l'anatomie.

### **3.3.3 Apprentissage incarné**

Les théories de l'apprentissage incarné reposent sur le fait que les gestes que nous faisons ont un effet non seulement sur le monde qui nous entoure, mais également un effet sur notre monde intérieur. En effet, ils permettent de façonner nos perceptions, nos décisions,

nos émotions et notre mémoire (Barsalou, 2008; Cherdieu et al., 2017; Kontra et al., 2012; Oh et al., 2011). Cela est démontré dans les processus d'apprentissage, depuis l'enfance (Cook et al., 2008; Novack and Goldin-Meadow, 2015), où les gestes que nous faisons s'impriment dans notre mémoire (mémoire procédurale).

L'incarnation est un processus d'apprentissage qui comprend la cognition incarnée et l'apprentissage incarné (Cooper and Tisdell, 2020). La cognition incarnée comprend tous les processus cognitifs qui sont liés à l'interaction du corps avec l'environnement (Jang, 2011).

L'apprentissage incarné a été étudié dans plusieurs disciplines universitaires, telles que les mathématiques (Cook et al., 2017), la physique (Johnson-Glenberg and Megowan-Romanowicz, 2017), la chimie (Ping et al., 2021), où l'incarnation contribue à de meilleurs résultats d'apprentissage.

Des études ont montré que l'apprentissage incarné diminue la quantité de charge cognitive nécessaire au processus de mémoire de travail pendant l'acquisition d'informations (Cook et al., 2013; Ping et al., 2021). Cela s'explique par le fait que l'encodage acté (gestuel) est probablement meilleur que l'encodage verbal pour la mémorisation à long terme (Masumoto et al., 2006). L'approche théorique révèle que les zones cérébrales activées pendant le mouvement sont réactivées pendant l'imagination de telle ou telle action (Barsalou, 1999).

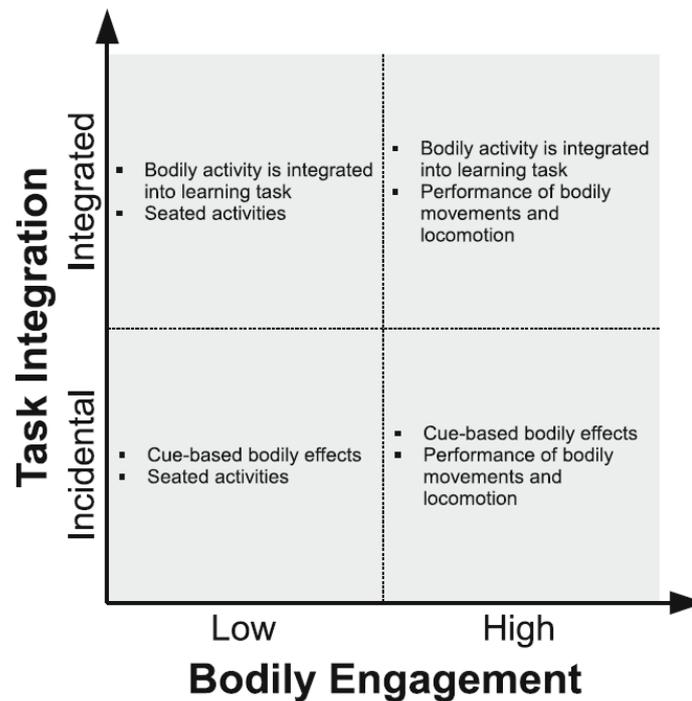
Les chercheurs ont suggéré que l'apprentissage de l'anatomie nécessitait une forte interaction avec l'environnement en général et avec les outils numériques en particulier (Nguyen et al., 2012). De même, une incarnation qui implique un mouvement de la partie du

corps en cours d'apprentissage est plus efficace qu'un mouvement qui n'est pas lié à cette partie du corps (Skulmowski and Rey, 2018; Wilson and Golonka, 2013). L'anatomie semble donc être la discipline idéale pour bénéficier de cette méthode pédagogique. C'est ce qu'on appelle la mise en œuvre corporelle des cibles d'apprentissage (Gallagher and Lindgren, 2015; Hutto et al., 2015) ou la congruence gestuelle.

Il existe plusieurs niveaux d'incarnation selon la taxonomie de Johnson-Glenberg (Johnson-Glenberg et al., 2014), et de Skulmowski (Skulmowski and Rey, 2018).

Johnson-Glenberg les classe en quatre catégories, selon trois facteurs que sont l'engagement moteur, la congruence gestuelle, et l'immersion perçue. L'engagement moteur est l'importance des parties du corps qui entrent en action (Efférence). Il est faible si l'on est assis, et fort si l'on est debout et que l'on bouge tout son corps. La congruence gestuelle est le lien entre l'objet d'apprentissage et la partie mise en mouvement. L'immersion perçue ou le degré d'immersion est en lien avec l'environnement, avec le degré de perception de l'apprenant (afférence) et dépend de la fidélité de l'environnement (taille écran, sensation...).

Selon la taxonomie de (Skulmowski and Rey, 2018) (**Figure 12**), seuls l'engagement corporel et l'intégration à la tâche (congruence gestuelle) comptent. L'immersion perçue n'est applicable que dans un environnement numérique et est donc trop excluante pour faire partie de la taxonomie.

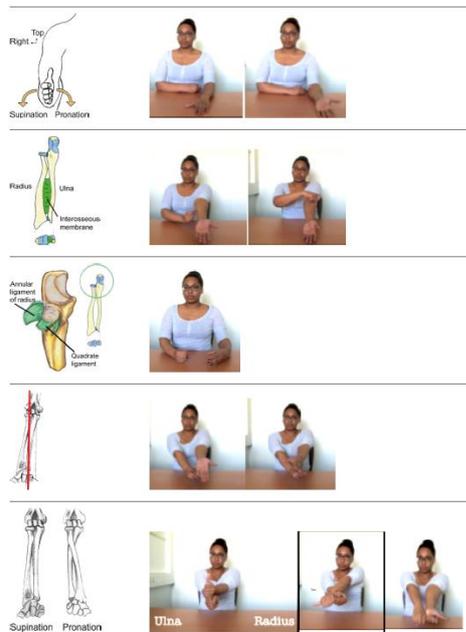


**Figure 12** : Taxonomie de l'incarnation dans l'éducation (Skulmowski and Rey, 2018).

Les résultats de l'apprentissage sont sensibles au niveau d'incarnation (faible vs élevé) selon Johnson-Glenberg (Johnson-Glenberg and Megowan-Romanowicz, 2017).

Des travaux portant sur de faibles niveaux d'incarnation, avec le mouvement d'une partie seulement du corps (engagement corporel faible), démontrent que ces derniers semblent apporter une amélioration des performances.

Par exemple, pour l'anatomie de l'avant-bras, une étude montre que l'exécution de gestes améliore, par rapport à une simple visualisation de gestes (**Figure 13**) (Cherdiou et al., 2017), la rétention à trois jours, le sentiment d'interaction et la motivation des étudiants.



**Figure 13** : Exemple d'apprentissage de l'anatomie de l'avant-bras, à congruence corporelle forte mais engagement moteur faible (Cherdieu et al., 2017).

Pour l'anatomie et la fonction du muscle cardiaque, les résultats immédiats sont meilleurs pour le groupe qui a fait des gestes (Macken and Ginns, 2014).

Pour l'apprentissage des nerfs crâniens, les résultats à l'examen final sont significativement meilleurs dans le groupe qui a mimé l'action des nerfs crâniens, et notamment à long terme (**Figure 14**) (Dickson and Stephens, 2015).

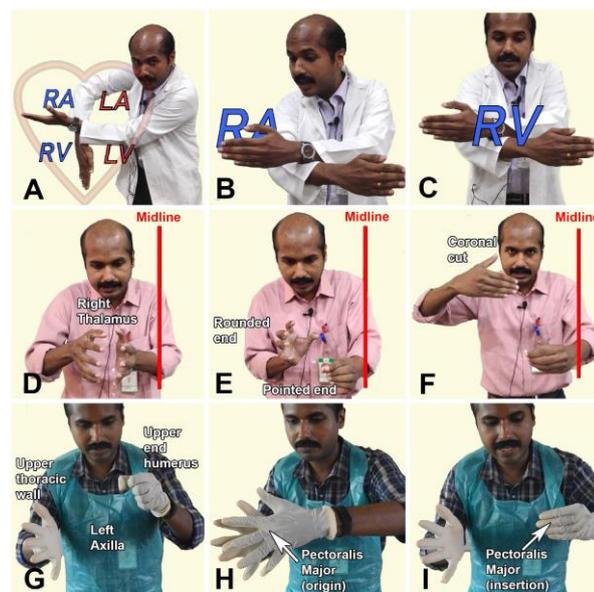


**Figure 14** : Exemple de l'apprentissage des nerfs crâniens par le mime facial de ceux-ci (Dickson and Stephens, 2015).

D'autres études ont étudié plus particulièrement des niveaux d'incarnation plus élevés, impliquant le corps entier de l'apprenant (engagement corporel fort) et elles suggèrent un bénéfice sur l'apprentissage de l'anatomie et la rétention à long terme (Johnson-Glenberg and Megowan-Romanowicz, 2017; Rabattu et al., 2022).

Il semble donc que l'impact pédagogique soit indépendant de l'importance de l'engagement corporel, ou du moins, qu'il ne soit pas le seul facteur.

Concernant la congruence corporelle, voici deux études à faible niveau d'incarnation, avec un faible engagement moteur. La première étude (Yohannan et al., 2022) est à faible congruence corporelle, car il s'agit de mimer les mouvements oculaires avec les mains. Elle montre un effet positif sur la compréhension spatiale (**Figure 15**). Il s'agit de « Air Anatomy » qui combine des gestes de pointage ou de traçage et des gestes iconiques représentant les structures anatomiques, qui permettait d'améliorer les résultats des étudiants ayant le plus bas niveau de capacité de rotation mentale.



**Figure 15** : Exemple d' « Air Anatomy » ou l'enseignant mime et effectue des gestes pour expliquer l'anatomie spatiale (Yohannan et al., 2022).

La seconde est à forte congruence (Cherdieu, 2017), car il s'agit du mouvement de l'avant-bras pour l'apprentissage de l'anatomie de l'avant-bras. Elle confirme des effets positifs à long terme (test de connaissances).

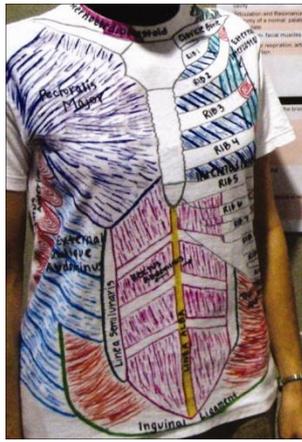
Ces deux études montrent un effet positif de l'incarnation, il semble donc également que l'apprentissage soit indépendant de la congruence corporelle, ou du moins, qu'il ne soit pas le seul facteur.

L'incarnation peut s'associer aux nouvelles technologies, notamment numériques, qui augmentent habituellement la logistique financière et technique de sa mise en œuvre.

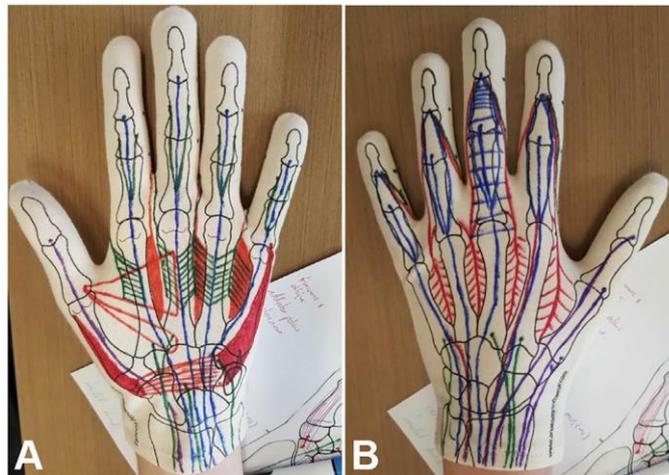
Toutefois, ces nouvelles technologies ne nécessitent pas forcément une logistique importante : par exemple, en dessinant des structures anatomiques sur le corps (McMenamin, 2008) (**Figure 16**), sur des T-shirts (Skinder-Meredith, 2010) (**Figure 17**), ou avec des gants pré-imprimés sur lesquels les étudiants dessinaient les structures anatomiques (Smyth et al., 2021) (**Figure 18**).



**Figure 16** : Exemple de peinture sur le corps dans l'apprentissage de l'anatomie de la main et de la face (McMenamin, 2008).

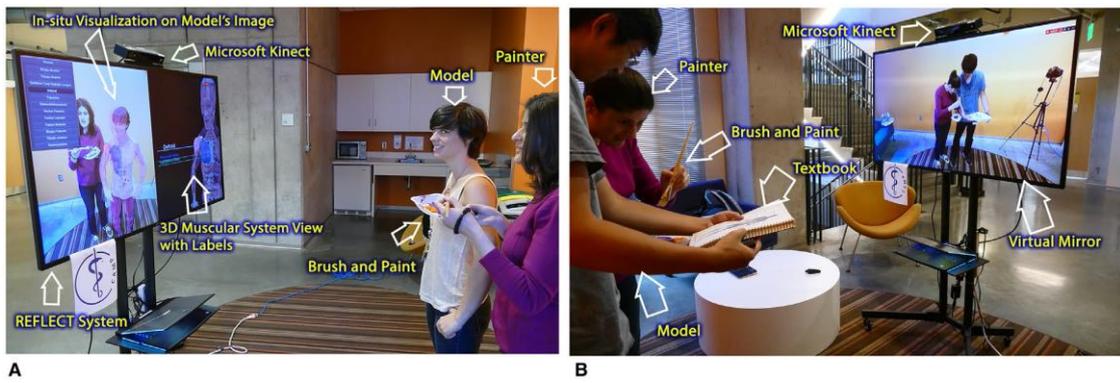


**Figure 17** : Anatomie de la respiration en vue antérieure (Skinder-Meredith, 2010).

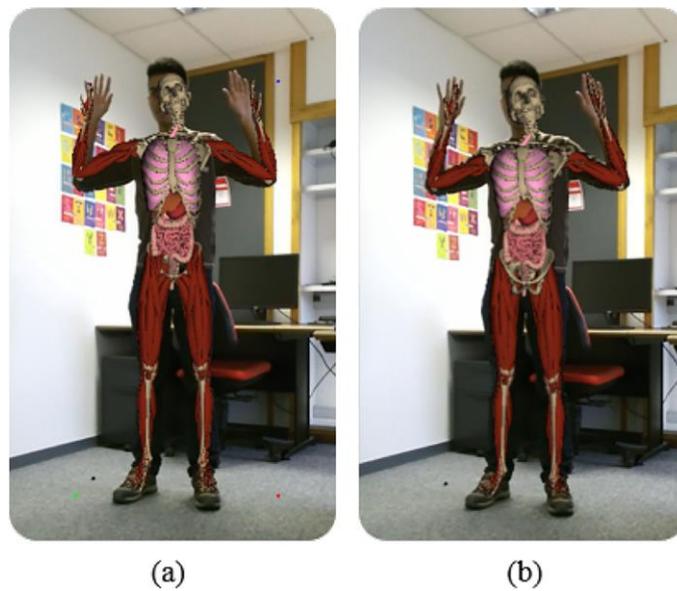


**Figure 18** : Apprentissage de l'anatomie de la main par dessin sur gants en latex (Smyth et al., 2021).

D'autres nécessitent une logistique plus importante et ont un coût élevé. Il s'agit notamment des études impliquant la réalité virtuelle (Weyhe et al., 2018) ou la réalité augmentée, comme la projection anatomique sur le corps de l'apprenant (Barmaki et al., 2019; Bauer et al., 2017; Hoang et al., 2017) (**Figure 19, 20 et 21**),



**Figure 19** : Exemple de peinture corporelle virtuelle (Barmaki et al., 2019).



**Figure 20** : Système de réalité augmentée avec superposition vidéo sur écran (Bauer et al., 2017).



**Figure 21** : Projection anatomique sur apprenant en réalité augmentée (Hoang et al., 2017).

Il semble donc que l'amélioration des performances ne soit pas dépendante uniquement de la logistique et du coût des outils mis en œuvre, bien qu'aucune étude ne compare les effets de tels programmes identiques, l'un avec coût élevé et l'autre non.

Ces effets bénéfiques de l'incarnation sur l'apprentissage doivent donc être pondérés (Cook et al., 2017; Dargue et al., 2019). Il ne semble pas évident que les apprentissages avec des degrés élevés d'incarnation soient plus bénéfiques sur le plan pédagogique (Tran et al., 2017). De plus, il faut se méfier de la charge mentale (Ruiter et al., 2015; Skulmowski et al., 2016), qui ne doit pas être trop élevée pour ne pas produire de surcharge cognitive. Il faut également trouver le bon degré d'interactivité, qui ne doit être ni trop élevé ni trop bas, pour produire l'effet le plus bénéfique sur la performance d'apprentissage (Kalet et al., 2012).

Certains auteurs ont démontré que les étudiants qui avaient le plus de difficultés visuo-spatiales étaient ceux qui bénéficiaient le plus de l'apprentissage incarné, comme le montre l'étude de Yohannan (Yohannan et al., 2022).

De plus, certaines études suggèrent que l'incarnation est particulièrement efficace pour l'apprentissage de l'anatomie fonctionnelle (Guillot et al., 2007; Johnson-Glenberg and Megowan-Romanowicz, 2017; Smyth et al., 2021).

La plupart des études retrouve un niveau élevé de satisfaction pour ces moyens pédagogiques. Par exemple, pour l'anatomie des nerfs et des vaisseaux spinaux, cette étude (Oh et al., 2011) montre que la satisfaction des étudiants est élevée pour ces méthodes d'enseignement.

A l'analyse de ces données bibliographiques, il semble exister un intérêt croissant pour cette méthode d'apprentissage de l'anatomie, mais il manque de preuves formelles de ses bénéfices sur les domaines et le type de connaissance améliorés, sur les étudiants qui en bénéficient le plus et sur les modalités d'incarnation les plus utiles.

Les objectifs de ce travail étaient donc d'explorer l'impact pédagogique de l'apprentissage incarné, de développer un outil numérique interactif d'apprentissage incarné et d'explorer les différents facteurs qui entrent en jeu dans cet apprentissage.

## 4 EXPERIMENTATIONS

Nous avons conduit une première étude écologique pour étudier l'impact de l'intégration d'un apprentissage incarné au sein d'un cursus de kinésiologie de l'université de Lyon sur l'apprentissage de l'anatomie fonctionnelle.

Puis nous avons développé un logiciel d'apprentissage de l'anatomie, numérique, interactif en 3 dimensions, et mené une étude randomisée contrôlée sur l'impact pédagogique de l'incarnation, ainsi que sur les facteurs l'influençant (charge mentale, compétences visuo-spatiales et satisfaction), sur un groupe d'étudiants en 2<sup>ème</sup> année de médecine à l'université de Grenoble-Alpes.

Notre première étude concernait l'école de STAPS de Lyon. Il s'agissait d'une étude interventionnelle de cohorte (sur deux années successives), en condition écologique, avec l'intégration d'un programme d'enseignement incarné au sein d'une classe de kinésiologie de 2<sup>ème</sup> année. Le but de cette étude était d'étudier l'impact pédagogique sur l'apprentissage de l'anatomie fonctionnelle au sein de cette classe. Cette étude possédait un degré élevé d'intégration de l'incarnation dans la tâche d'apprentissage (congruence élevée). Les étudiants bougeaient la partie de leur corps dont ils apprenaient l'anatomie fonctionnelle. Le niveau d'engagement corporel était également élevé, car les étudiants étaient debout et bougeaient l'intégralité de leur corps. Ils étaient contrôlés par un groupe composé de la même classe, de l'année précédente, avec le même contenu de cours, mais sans effectuer de mouvements. Nous étions donc dans des conditions d'incarnation élevées selon Skulmonwski (Skulmowski et al., 2016).

Nous avons ensuite développé et évalué une application pédagogique, numérique en 3 dimensions, interactive, avec possibilité d'implémentation d'un apprentissage incarné. Cela nous a permis de réaliser une seconde étude sur l'outil numérique, de l'impact pédagogique que pouvait avoir l'incarnation sur les étudiants en deuxième année de médecine à l'université de Grenoble-Alpes et sur les facteurs influençant les résultats.

Ce travail nous a permis d'analyser l'intérêt pédagogique de l'incarnation sur l'apprentissage de l'anatomie descriptive et fonctionnelle, et de discuter, à la lumière des résultats, des avantages et inconvénients de cette méthode pédagogique.

#### **4.1 Etude « STAPS »**

Pour notre première étude, il s'agissait de 121 étudiants en première année de STAPS de l'université de Lyon, sur les années 2016 et 2017. Le groupe contrôle était composé de 61 étudiants de première année de STAPS de l'année 2016, et le groupe expérimental était un groupe de 60 étudiants de première année de STAPS de l'année 2017.

Au préalable, tous les étudiants devaient répondre à 20 QCM d'anatomie générale, pour contrôler la comparabilité des 2 groupes. Puis les étudiants recevaient un cours par le même conférencier, consistant en une description anatomique et au visionnage de vidéos en 3 dimensions. Le groupe contrôle (CTRL) devait ensuite résoudre des exercices d'anatomie fonctionnelle en restant assis à leur place, alors que le groupe expérimental (EXP) devait résoudre les mêmes exercices, mais en exécutant et en ressentant le mouvement avant de

résoudre l'exercice. L'ensemble du cours d'anatomie comprenait 12 sessions de cours (24 heures au total) et 12 sessions pratiques (24 heures au total), soit un total de 48 heures.

Les étudiants ont été évalués à 1 mois et à 2 mois par des examens qui comprenaient 40 QCM en 30 minutes, puis à 3 mois par un examen de 100 QCM en 1 heure. Les deux premiers examens avaient le même niveau de difficulté et contenaient des questions correspondant aux trois premières catégories de la taxonomie de Bloom (connaissance, compréhension, application). L'examen final contenait des questions correspondant aux quatre premières catégories de la taxonomie de Bloom (connaissance, compréhension, application, analyse) (Bloom, 1956).

Le nombre de réponses correctes a été collecté pour chaque test, à savoir le test de base, l'examen 1, l'examen 2 et l'examen final, et la moyenne a été calculée sur 20.

Tout d'abord, la distribution normale de toutes les données a été vérifiée visuellement, puis confirmée à l'aide du test de Shapiro-Wilk.

Ensuite, nous avons examiné si le niveau initial de connaissances en anatomie était équivalent entre les groupes EXP et CTRL, et en fonction du sexe (homme et femme). Pour ce faire, nous avons effectué une analyse de variance (ANOVA) à deux voies avec le GENRE et le GROUPE comme facteurs inter-sujets et le score initial comme facteur intra-sujet.

Pour évaluer l'effet de l'exécution des mouvements pendant l'apprentissage de l'anatomie, nous avons effectué une ANOVA à mesures répétées (ANOVARM), avec le GROUPE (EXP vs CTRL) comme facteur inter-sujet, et la SESSION DE TEST (Examen 1, Examen 2, et Examen final) comme facteur intra-sujet. Lorsque les interactions étaient significatives ( $p <$

0,05), l'origine de l'interaction a été étudiée en utilisant des comparaisons planifiées avec des tests post-hoc corrigés par Bonferroni.

Toutes les analyses ont été effectuées avec le logiciel Statistica (Statsoft Inc., Tulsa, OK, USA).

## 4.2 Développement d'une application pédagogique

Le développement de l'application s'est fait par une collaboration avec les laboratoires partenaires (**Figure 22**):

- **TIMC** : Recherche Translationnelle et Innovation en Médecine et Complexité, et plus précisément l'équipe GMCAO (Gestes Médico-Chirurgicaux Assistés par Ordinateur), laboratoire spécialisé dans les technologies pour la santé, et coordinateur du projet. TIMC s'intéresse en particulier à la modélisation du corps de l'apprenant
- **LIG** : Laboratoire d'Informatique de Grenoble, à travers son équipe Ingénierie de l'Interaction Humain-Machine, possède une très grande expérience de conception, développement et évaluation de techniques d'interaction. Il coordonne les tâches liées à l'interaction en Réalité Augmentée.
- **LJK** : Laboratoire Jean Kuntzmann, coordonne les tâches relatives au formatage et à l'accessibilité des connaissances anatomiques et au contenu pédagogique.
- **LIBM** (Lyon) : Laboratoire Interuniversitaire de Biologie de la Motricité, apporte sa connaissance des processus cognitifs dans l'apprentissage de l'anatomie. Il coordonne l'évaluation via la plateforme.
- **Gipsa-lab** : Laboratoire Grenoble Images Parole Signal Automatique, département "Parole et cognition", étudie les processus comportementaux et cognitifs dans les

interactions de communication. Il doit évaluer les processus cognitifs de l'apprentissage incorporé via les nouveaux dispositifs d'interaction mis en place.

- **Anatoscope** : Startup spécialisée dans le transfert d'anatomie et l'animation temps réel, avec la conception de maquettes anatomiques personnalisées et simulables physiquement. Elle contribue à la modélisation du corps de l'apprenant et coordonne les travaux d'intégration.

Ce projet pluridisciplinaire, appelé An@tomy2020 (<https://www.timc.fr/Anatomy2020>) a bénéficié d'un financement ANR :

- ANR grant : 679 991 euros
- ANR Programme : (DS0701) 2016
- Project ID: ANR-16-CE38-0011



**Figure 22** : Logos des laboratoires partenaires.

La première étape a été de concevoir le projet pédagogique, et de définir son champ d'action. Nous avons décidé de nous centrer sur l'apprentissage de l'anatomie du genou pour 3 raisons :

- Il s'agit d'une articulation qui contient des structures osseuses, ligamentaires, musculaires, et donc un apprentissage nécessitant une approche de vocabulaire, de

morphologie, de rapport entre les structures, ainsi que des notions d'anatomie fonctionnelle.

- Il s'agit d'une articulation qui peut être rapportée à un mode de fonctionnement assez simple, avec des mouvements selon un seul plan (mouvement de flexion-extension), plus facile à appréhender que l'articulation de l'épaule par exemple, ou d'une articulation faisant entrer en jeu plusieurs articulations, comme le coude.
- Il s'agit également d'une articulation qui est « visible » par l'étudiant et accessible sur son propre corps.

Nous avons donc rédigé des contenus pédagogiques (scenarii pédagogiques), en listant les structures anatomiques à prendre en compte, limitant les structures qui participent directement à l'articulation du genou, à son maintien et à son mouvement.

Puis nous avons défini la forme de l'enseignement prise dans le logiciel :

- Nous avons opté pour une première partie de cours sur ordinateur, avec le même visuel que le logiciel, où étaient détaillés le nom des structures, leurs rapports et leur fonction.
- Une seconde partie était une exploration libre, par manipulation par l'étudiant, du modèle anatomique et interaction avec celui-ci au travers d'une manette de jeux vidéo. Cette partie pourrait être secondairement implémentée d'incarnation pour le groupe expérimental.
- La dernière partie était plus interactive, sous forme de « *serious game* », consistant en une série de questions anatomiques (*quizz*) comprenant de l'anatomie descriptive et fonctionnelle, tels que des QCM, des Vrai-Faux, reconnaissance de structures, et pointage.

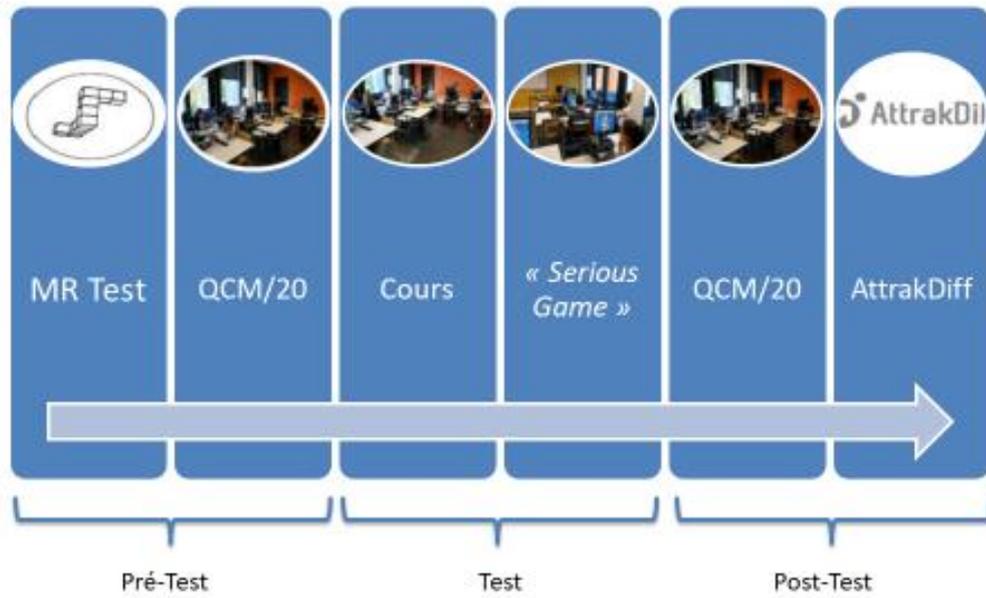
Un travail collaboratif a été effectué avec Anatoscope pour accorder les images du modèle sur le scénario, en définissant les différentes vues, les légendes, les animations, les interactions possibles.

Ce découpage en 3 parties permettait :

- Un apprentissage du vocabulaire spécifique du genou, et des éléments morphologiques (anatomie descriptive).
- Un travail personnel d'exploration libre, en réalité virtuelle avec interaction, pour appréhender l'anatomie tridimensionnelle et fonctionnelle (anatomie spatiale et fonctionnelle).
- Une évaluation des connaissances et un renforcement immédiat par la partie « *serious game* », permettant de mettre en application et de renforcer les deux parties précédentes. Cette phase de « *quizz* » n'était pas notée, et l'étudiant devait trouver la bonne réponse pour passer à la question suivante.

Nous avons réalisé une étude pilote sur 10 étudiants de 2<sup>ème</sup> année de médecine. Tous les étudiants réalisaient un pré-test avec un MR-Test et un QCM d'anatomie sur 20. Ils bénéficiaient ensuite de la phase expérimentation selon les 2 phases : cours numérique de l'anatomie du genou sur l'application pendant 10 minutes et « *Serious game* » sous forme de quizz pendant 10 minutes. Puis ils réalisaient le post-test sous forme d'un QCM d'anatomie sur 20, d'un questionnaire de satisfaction et un outil d'évaluation de l'outil numérique (AttrakDiff) (**Figure 23**).

# Protocole



**Figure 23 :** Protocole de l'étude pilote.

Nous n'avons pas étudié, lors de cette étude pilote, la partie exploration libre, pour des raisons logistiques, afin de pouvoir faire passer tous les étudiants lors de la même séance.



**Figure 24 :** Etudiants lors de l'étude pilote, pendant la partie « cours ».

Nous avons évalué l'application et sa fonctionnalité, pour détecter les incohérences, les « *bugs* » informatiques et les problèmes de fonctionnement de l'application.

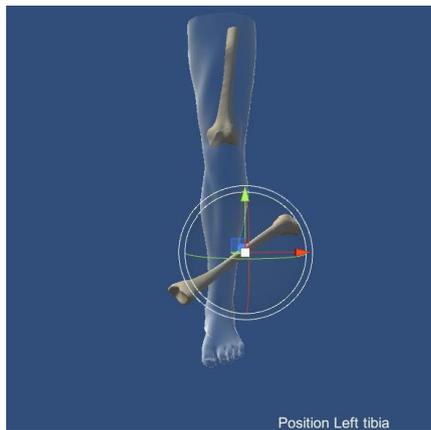
Initialement, l'interaction se faisait par le biais d'une souris d'ordinateur, qui s'est vite avérée difficile d'utilisation par un étudiant debout, qui doit de surcroît bouger le membre inférieur pendant l'exercice. Nous avons opté pour une manette de jeux vidéo, qui permettait d'utiliser toutes les fonctionnalités (avant-arrière, rotations, translations, apparition et disparition des structures) tout en bougeant son corps.

L'application a finalement permis une utilisation ergonomique, sans dysfonctionnement informatique, avec un rendu visuel tout à fait agréable.

<https://youtu.be/RAo-YB62lmk>.

Cette étude a été faite sur un petit groupe d'étudiants, sans création de groupe contrôle. L'objectif était de tester l'application pour effectuer certaines corrections et rendre l'application plus ergonomique. Nous n'avons pas effectué de tests statistiques sur les résultats aux QCM d'anatomie du fait de l'absence de groupe-contrôle et de la taille de l'échantillon.

Nous avons retiré, suite à cette étude, le fait de placer les structures sur un modèle 3D (**Figure 25**), car la tâche était trop compliquée, entraînant une perte de temps, sans grande valeur pédagogique.



**Figure 25** : Etape du scénario pour placer le tibia sur le modèle anatomique, finalement retirée de l'étude.

Nous avons changé l'interface, initialement un écran d'ordinateur par un écran de vidéo projecteur plus grand, augmentant l'immersion perçue (**Figure 26**).



**Figure 26** : Passage d'un écran d'ordinateur à un écran de vidéoprojecteur.

L'évaluation de l'outil numérique par l'échelle AttrackDiff a permis de montrer, entre autres, que l'outil était un outil « technique » et « peu social », mais qu'il avait de bonnes qualités hédoniques et pragmatiques, en faisant un outil « désiré » par les étudiants (**Figures 27, 28 et 29**).

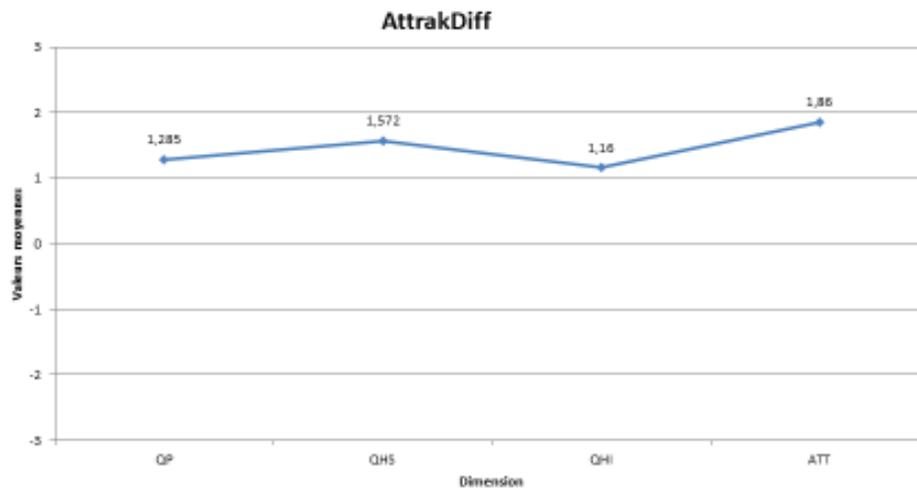


Figure 27 : Valeur moyennes des qualités pragmatiques, hédoniques et de l'attractivité, selon l'échelle AttrakDiff.

## Diagramme des paires de mots

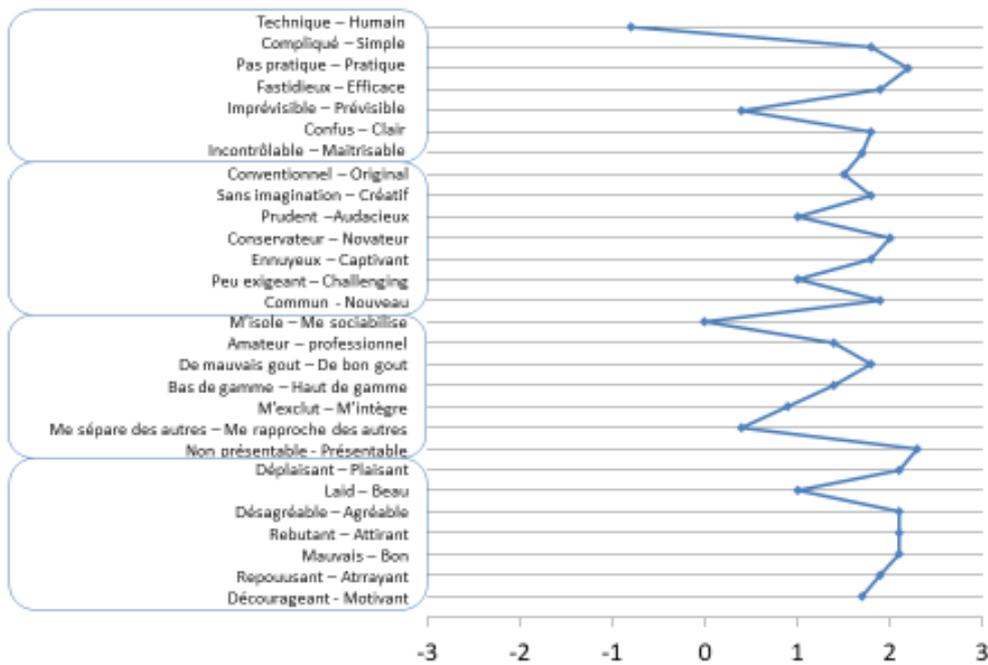
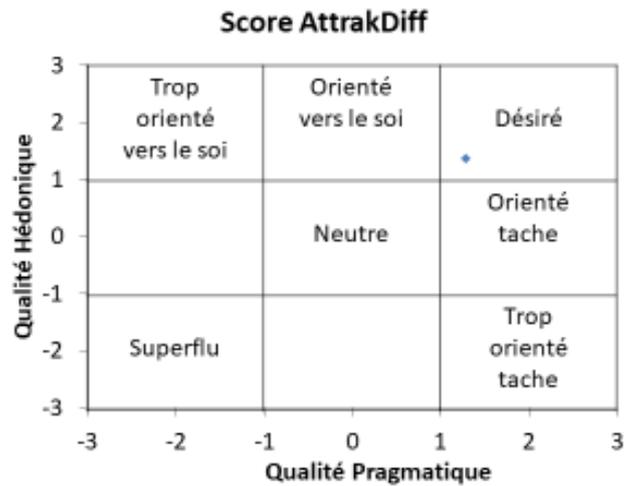


Figure 28 : Diagramme des paires de mots montrant les forces et les faiblesses de l'outil numérique.



**Figure 29** : Portfolio des résultats retrouvant un outil « désiré » par les étudiants, combinant de bonnes qualités hédoniques et pragmatiques.

La satisfaction des étudiants quant à l'utilisation de l'application a mis en évidence des scores élevés : Une évaluation du cours de 8,8/10 de moyenne, du « *serious game* » de 8,5/10 de moyenne et une valeur pédagogique ressentie de 9,4/10 de moyenne.

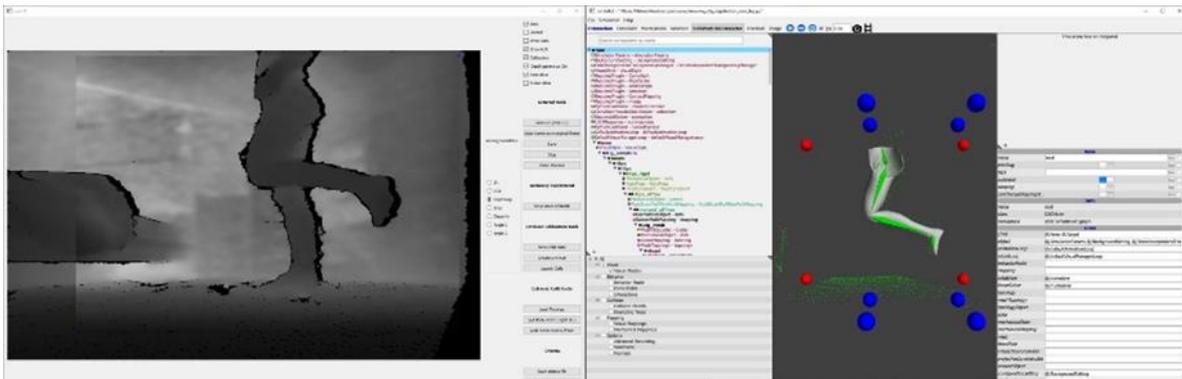
Nous avons ensuite implémenté dans cette application la possibilité d'incarnation. Le système s'est doté pour cela :

- D'une caméra de capture de mouvement de type RGB-D (caméra de profondeur Intel Realsense D435) qui captait la jambe de l'étudiant et d'un logiciel qui envoyait un nuage de points (**Figure 30**).
- D'un logiciel SOFA qui faisait le lien entre le nuage de points et le modèle anatomique en 3D articulé (**Figure 31**).
- Les données sur les articulations (angles) étaient communiquées au moteur de jeu UNITY 3D, qui s'occupait du rendu visuel.

-



**Figure 30 :** Caméra de profondeur Asus®, pour la capture du mouvement du membre inférieur de l'étudiant.



**Figure 31 :** Fonctionnement et interface du logiciel SOFA (<https://www.sofa-framework.org/>), qui fait le lien entre un nuage de points capturé par la caméra de profondeur (Image de gauche) et le modèle anatomique articulé (Image de droite).

### 4.3 Etude « Médecine »

Nous avons voulu étudier l'impact pédagogique et la satisfaction de l'utilisation d'un logiciel dédié à l'incarnation, ainsi que les facteurs les influençant, sur des étudiants de deuxième année de médecine.

Pour atteindre ces objectifs, nous avons réalisé un essai randomisé, contrôlé, avec recueil prospectif des données.

Il s'agissait de 60 étudiants en 2<sup>ème</sup> année de médecine à la faculté de médecine de Grenoble. Les participants ont été informés des critères d'exclusion : troubles visuels, auditifs ou moteurs empêchant l'utilisation de l'outil interactif.

Les volontaires ont pu choisir leur rendez-vous d'une heure et trente minutes pour l'étude grâce à un planning en ligne. Ils ont été accueillis au LADAF (laboratoire d'anatomie des Alpes françaises) entre Novembre 2021 et Juin 2022.

Les investigateurs leur ont présenté le sujet de l'étude, le déroulement du protocole et leur ont demandé de signer un consentement écrit. Chaque étudiant a reçu un numéro aléatoire entre 0 et 100 pour l'analyse statistique et a été assigné au hasard par un algorithme informatique dans un groupe expérimental (EXPE) ou de contrôle (CTRL).

La randomisation par bloc était justifiée d'un point de vue pédagogique, car les étudiants n'étaient pas évalués sur ce sujet en 2<sup>ème</sup> année de médecine. Cela n'a pas été une source d'inégalité.

L'étude a également été partagée en 3 phases successives :

### **Phase de pré-test**

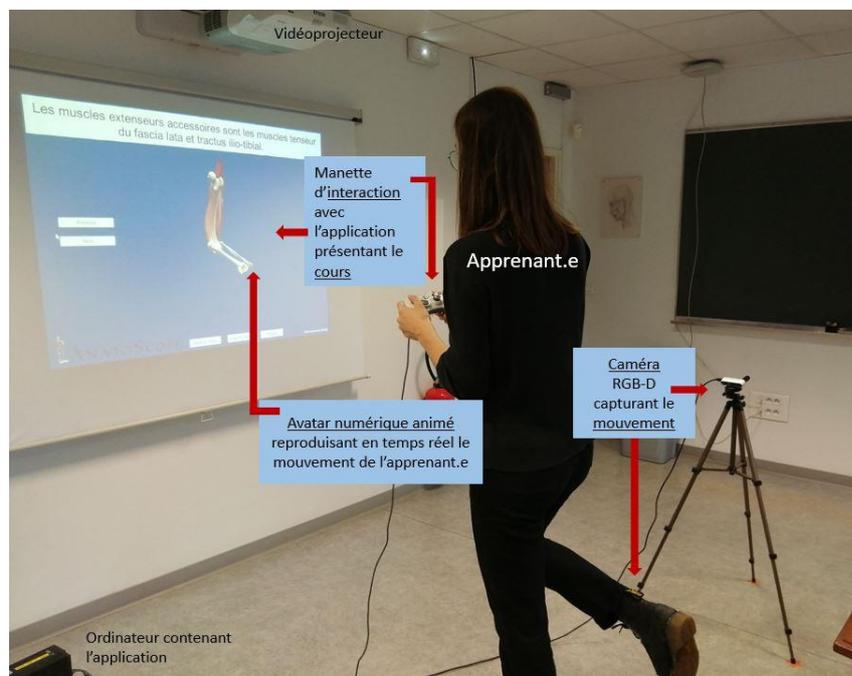
Les étudiants ont réalisé un MR-Test, qui est un test de rotation mentale élaboré par Vandenberg et Kuse (Vandenberg and Kuse, 1978). Ce test permet d'évaluer la capacité à visualiser et à effectuer une rotation dans l'espace 3D d'une figure en 2D. Il consiste en la visualisation d'une figure géométrique, suivi de 4 propositions de figures selon une rotation dans l'espace. Deux d'entre elles sont des répliques de la première et les deux autres sont des

distracteurs. L'étudiant doit trouver les deux répliques correctes avec une rotation spatiale différente. Le test comporte 24 items pour une durée de 10 minutes (**Annexe 1**).

Les étudiants ont ensuite réalisé une série de 20 QCM sur l'anatomie du genou pendant 10 minutes (**Annexe 2**). La fiabilité du test d'anatomie a été évaluée à l'aide du test alpha de Cronbach, qui était de 0,68. Ce résultat peut être considéré comme satisfaisant (Streiner, 2003).

### Phase de test

L'étudiant se trouvait devant la projection du cours avec une manette de jeu vidéo dans les mains. Une caméra était positionnée à la droite de l'étudiant, et calibrée pour capturer le mouvement de la jambe droite de l'étudiant du groupe expérimental afin d'animer la jambe de l'avatar numérique (**Figure 32**).



**Figure 32** : Exemple de l'utilisation de la station, et des systèmes de capture et de retransmission du mouvement de l'étudiante.

Le groupe contrôle consultait le cours pendant 10 minutes, effectuait une exploration libre de 10 minutes, où il pouvait interagir et animer l'avatar à l'aide d'une manette de jeu vidéo, et enfin le « *serious game* » sous forme de quizz pendant 10 minutes.

Le groupe expérimental effectuait le même parcours, mais avec la possibilité d'animer l'avatar par le mouvement de son propre membre inférieur (**Figure 33**).



**Figure 33** : Exemple de réalisation de la séquence, de manière statique pour le groupe contrôle (image de gauche) et dynamique pour le groupe expérimental (image de droite)

L'ensemble de la phase de test présentait une durée d'environ 30 minutes.

<https://youtu.be/jBrq4bGYulo>.

### Phase de post-test

Les étudiants remplissaient à la fin de l'expérimentation le NASA Task Load Index (NASA TLX), qui donne une évaluation subjective multidimensionnelle de la charge mentale

de l'expérimentation. Ce questionnaire est divisé en deux parties, la première partie est séparée en six sous-échelles subjectives évaluant les demandes mentales, physiques et temporelles, la performance, l'effort et la frustration. La seconde partie consiste à créer une pondération de ces sous-échelles combinées par paires en laissant l'étudiant choisir celle qui est la plus pertinente pour caractériser la charge de travail (**Annexe 3**).

Les étudiants évaluaient l'outil numérique selon le modèle de Hassenzahl (Hassenzahl, 2003) par le questionnaire Attrakdiff (**Annexe 4**). Ce modèle est conçu pour mesurer l'expérience et la satisfaction des utilisateurs d'une application ou d'un logiciel. Le questionnaire Attrakdiff est composé de 28 items d'adjectifs opposés (par exemple "bon ou mauvais", ...), chaque item ayant sept niveaux possibles dans une échelle d'intensité.

Ces items créent une valeur pour la qualité pragmatique (PQ), la qualité hédonique (HQ - identité HQ-I et HQ-stimulation HQ-S) et l'attractivité (ATT) du logiciel.

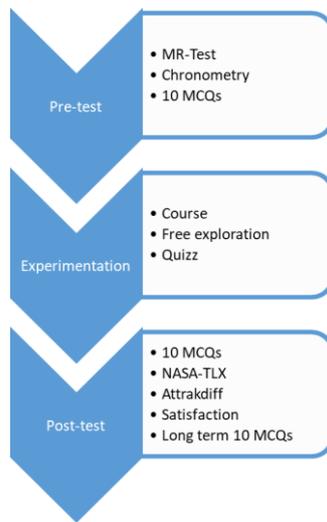
La Qualité Hédonique-Stimulation (HQS) indique la qualité du produit en termes de fonctions et de contenus nouveaux, intéressants et stimulants.

La Qualité-Identité Hédonique (HQI) indique la capacité du produit à permettre à l'utilisateur de s'identifier à lui.

La qualité pragmatique (PQ) décrit la facilité d'utilisation du produit et indique dans quelle mesure les utilisateurs parviennent à atteindre leurs objectifs en utilisant le produit.

La dernière dimension est l'attractivité globale du logiciel.

Enfin, les étudiants remplissaient un questionnaire de satisfaction pour évaluer l'ensemble de l'expérience (**Annexe 5**).



**Figure 34** : Diagramme de flow des séquences de l'étude.

Un échantillon de 58 étudiants inclus, soit 29 par groupe, conférerait une puissance supérieure à 95% pour mettre en évidence une différence moyenne de 0,96 points à l'épreuve par QCM. Ces hypothèses sont issues de travaux précédents (Rabattu et al., 2022) où un score de 11,59 était retrouvé dans le groupe contrôle contre 10,63 dans le groupe expérimental. Les QCM n'étant pas identiques, nous avons donc choisi de calculer cet effectif sous l'hypothèse d'un écart-type moyen de 1 point, c'est-à-dire plus élevé que dans l'étude précédente, et d'un risque alpha de 5% en situation bilatérale.

Les données continues ont été analysées en utilisant les moyennes avec les écarts types ou les médianes avec les intervalles interquartiles et en utilisant le test t de Student ou le test de Mann-Whitney pour les valeurs non paramétriques.

Toutes les analyses statistiques ont été effectuées à l'aide du logiciel JAMOVI®, version 1.6.23.0.

Un formulaire CERGA (Comité d’Ethique pour les Recherche Grenoble-Alpes) a été rempli et soumis pour avis du comité d’éthique de Grenoble. Avis favorable CERGA-Avis-2021-

#### **17. (Annexe 6)**

Nous avons créé un formulaire d’information aux étudiants et une fiche de consentement éclairé.

## 5 CONTRIBUTIONS

### 5.1 Etude « STAPS »

Les données démographiques de la population étudiée sont représentées dans la

**Figure 35.**

Characteristic	Group CTRL	Group EXP	P value
<i>Age (in years)</i>			
Mean	19.7	19.3	0.093 (Student t-test)
S.D	1.42	1.21	
Minimum	18	18	
Maximum	22	21	
<i>Gender, n (%)</i>			
Male	50 (78)	43 (60.5)	0.179 (Chi squared test)
Female	11 (22)	17 (39.5)	

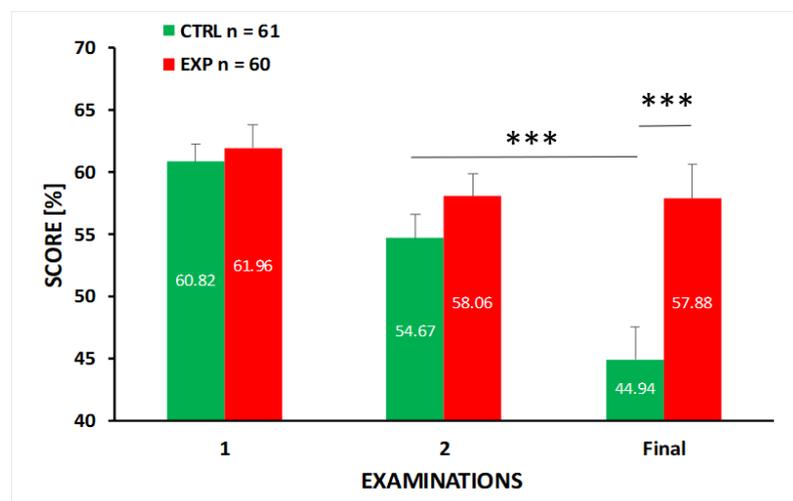
**Figure 35 :** Données démographiques de la population étudiée. (*SD = déviation standard, n = nombre*)

Le premier résultat a démontré que le niveau initial de connaissances en anatomie était équivalent dans les deux groupes, sans différence de sexe. L'ANOVA sur les scores initiaux n'a pas montré d'effet principal du GENRE, ni d'effet principal du GROUPE ou une interaction GENRE X GROUPE.

Le score moyen au test de base était de 11,59 (+/- 0,34) pour le groupe CTRL, et de 10,63 (+/- 0,43) pour le groupe EXP.

Le résultat principal de cette étude a révélé que l'apprentissage anatomique était favorisé par l'adjonction de mouvements physiques en contexte de classe. Les analyses post-hoc de Bonferroni ont révélé que les étudiants du groupe EXP ont obtenu de meilleurs résultats que ceux du groupe CTRL lors de l'examen final ( $p < 0,001$ ) (**Figure 36**).

Les données ont également montré que les étudiants du groupe CTRL avaient un score significativement plus faible à l'examen final qu'à l'examen 2 ( $p < 0,001$ ). La note moyenne de l'examen 1 était de 12,16 (+/- 0,28) pour le groupe CTRL et de 12,39 (+/- 0,38) pour le groupe EXP. Le score moyen à l'examen 2 était de 10,93 (+/- 0,39) pour le groupe CTRL et de 11,61 (+/- 0,36) pour le groupe EXP. Le score moyen à l'examen final était de 8,99 (+/- 0,52) pour le groupe CTRL et de 11,58 (+/- 0,55) pour le groupe EXP.



**Figure 36** : Scores en pourcents des groupes contrôle et expérimental aux trois examens. On retrouve une diminution significative des résultats du groupe contrôle à l'examen final ( $p < 0,001$ ).

Cet article a fait l'objet d'une publication dans *Anatomical Science Education* (Rabattu et al., 2022).

## 5.2 Etude « Médecine »

De novembre 2021 à Juin 2022, 60 étudiants volontaires, au total, ont été recrutés, 32 étudiants ont été affectés au groupe expérimental et 28 d'entre eux ont été affectés au groupe contrôle. La randomisation par bloc a été effectuée par un algorithme informatique simple de 0 ou 1 sans aucune distinction selon l'âge de l'étudiant.

Les caractéristiques de base des étudiants sont énumérées dans la **Figure 37**.

Characteristic	Group A – EXPE - 32	Group B - CTRL - 28	P value
<i>Age (in years)</i>			0.69 (student's t-test)
Mean	20,44	20,21	
S.D	2,87	1,23	
Minimum	18	18	
Maximum	35	24	
<i>Gender, n (%)</i>			0.83 (Chi-squared test avec correction de Yates)
Male	25% (8)	50% (14)	
Female	75% (24)	50% (14)	

**Figure 37** : Données démographiques de la population étudiée. (*SD = déviation standard, n = nombre*).

Chacun des étudiants a donné son consentement libre et éclairé, écrit, pour participer à l'étude (**Annexe 7**). Aucun étudiant n'avait moins de 18 ans.

Dans le groupe expérimental, l'âge moyen était de 20,44 ans et de 20,21 ans pour le groupe contrôle. La proportion de femmes était de 75% et 50% dans les groupes expérimental et contrôle.

### **Comparabilité des groupes**

Nous avons étudié les résultats aux différentes phases du pré-test entre chaque groupe. Les moyennes aux QCM initiaux sur 20 étaient de 7,4 (SD 3,6) pour le groupe expérimental et de 7,1 (SD 3,1) pour le groupe contrôle, sans différence entre les 2 groupes ( $p=0.735$ ). Les résultats au MR-Test étaient de 14,7 (SD 6.2) pour le groupe expérimental et de 17,4 (SD 6.2) pour le groupe contrôle, sans différence significative ( $p=0.092$ ). Nous avons donc pu conclure que les deux groupes étaient comparables.

### **Impact pédagogique**

Les moyennes aux QCM finaux sur 20 étaient de 9,1 (SD 3.4) pour le groupe expérimental et de 8 (SD 2.7) pour le groupe contrôle, sans différence significative ( $p=0.205$ ).

La moyenne des différences entre le QCM initial et le QCM final n'était pas significativement différente entre les groupes, avec une amélioration de 1,7 points (SD 3.6) pour le groupe expérimental et de 0.9 points (SD 2.8) pour le groupe contrôle ( $p=0.390$ ).

On retrouvait donc une plus grande amélioration entre le QCM initial et le QCM final pour notre groupe expérimental, mais sans significativité statistique.

	0 (N=28)	1 (N=32)	Total (N=60)	p value
<b>QCM initial</b>				0.735 <sup>1</sup>
Mean (SD)	7.1 (3.1)	7.4 (3.6)	7.3 (3.4)	
Range	2.0 - 14.0	0.0 - 15.0	0.0 - 15.0	
<b>MR-Test /24</b>				0.092 <sup>1</sup>
Mean (SD)	17.4 (6.2)	14.7 (6.2)	16.0 (6.3)	
Range	4.0 - 24.0	2.0 - 24.0	2.0 - 24.0	
<b>QCM Fin</b>				0.205 <sup>1</sup>
Mean (SD)	8.0 (2.7)	9.1 (3.4)	8.6 (3.1)	
Range	3.0 - 14.0	2.0 - 16.0	2.0 - 16.0	
<b>Diff_QCM</b>				0.390 <sup>1</sup>
Mean (SD)	0.9 (2.8)	1.7 (3.6)	1.3 (3.2)	
Range	-3.0 - 6.0	-7.0 - 14.0	-7.0 - 14.0	

1. Linear Model ANOVA

**Figure 38** : Analyses statistiques des résultats par groupe aux QCM initiaux, MR-Test, QCM finaux et différence entre QCM initial-QCM final. (0 = groupe contrôle, 1 = groupe expérimental).

### Effet des compétences visuo-spatiales

Nous voulions étudier si les étudiants qui avaient de bonnes compétences visuo-spatiales (les meilleurs scores au MR-Test), était ceux qui progressaient le plus entre les QCM initiaux et les QCM finaux.

Nous avons stratifié les étudiants selon la médiane au MR-Test (> ou < 17) et comparé la différence entre les résultats des QCM initiaux et finaux : Ceux qui réussissaient le mieux le MR-Test s'amélioraient en moyenne de 0.6 points entre les 2 QCM, alors que ceux qui avaient de moins bonnes capacités de rotation mentale s'amélioraient plus : 2.1 points en moyenne entre les 2 QCM, sans que cela ne soit significatif (p=0.073).

Les étudiants avec les moins bonnes compétences visuo-spatiales sont donc ceux qui s'améliorent le plus en utilisant notre logiciel, mais à la limite de la significativité statistique.

	0 (N=30)	1 (N=30)	Total (N=60)	p value
<b>Diff_QCM</b>				0.073 <sup>1</sup>
Mean (SD)	2.1 (3.4)	0.6 (2.9)	1.3 (3.2)	
Range	-7.0 - 14.0	-7.0 - 8.0	-7.0 - 14.0	

1. Linear Model ANOVA

**Figure 39** : Analyses statistiques d la différence entre les QCM initial- QCM final avec stratification selon le résultat au MR-Test (0 = MR test <17 ; 1 MR test > 17 (médianes)). (0 = groupe contrôle, 1 = groupe expérimental).

Nous avons, de la même manière, évalué les scores aux QCM initiaux et finaux ainsi que la progression entre les 2 QCM, selon chaque groupe, selon leur performance au MR-Test (> ou < 17) :

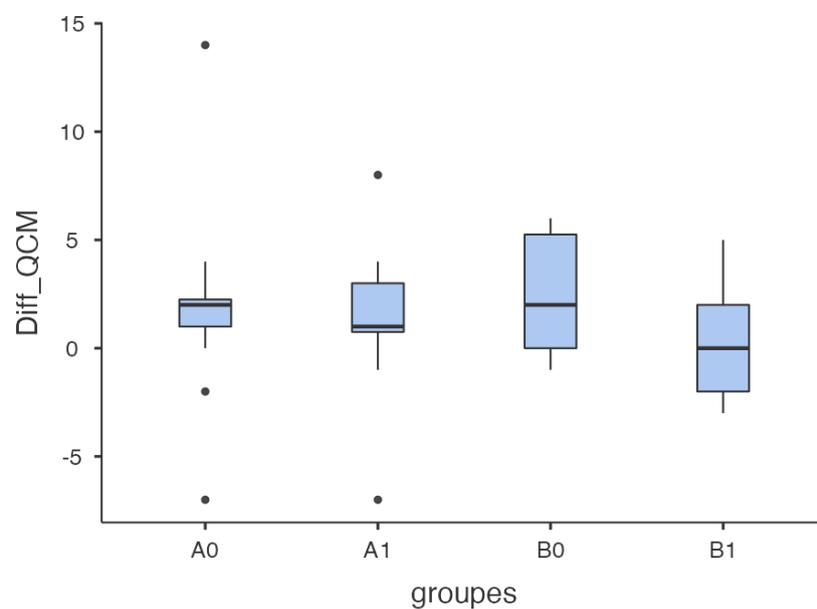
	A0 (N=20)	A1 (N=12)	B0 (N=10)	B1 (N=18)	Total (N=60)	p value
<b>QCM initial</b>						0.164 <sup>1</sup>
Mean (SD)	6.8 (3.7)	8.3 (3.5)	5.5 (2.3)	8.0 (3.2)	7.3 (3.4)	
Range	0.0 - 13.0	5.0 - 15.0	2.0 - 9.0	2.0 - 14.0	0.0 - 15.0	
<b>QCM Fin</b>						0.543 <sup>1</sup>
Mean (SD)	8.8 (2.8)	9.6 (4.2)	7.9 (2.4)	8.1 (2.9)	8.6 (3.1)	
Range	5.0 - 14.0	2.0 - 16.0	4.0 - 12.0	3.0 - 14.0	2.0 - 16.0	
<b>Diff_QCM</b>						0.237 <sup>1</sup>
Mean (SD)	1.9 (3.7)	1.2 (3.5)	2.4 (2.8)	0.1 (2.5)	1.3 (3.2)	
Range	-7.0 - 14.0	-7.0 - 8.0	-1.0 - 6.0	-3.0 - 5.0	-7.0 - 14.0	

1. Linear Model ANOVA

**Figure 40** : Analyses statistiques des résultats aux QCM initiaux, finaux et de la différence entre QCM initial-QCM final, selon les groupe contrôle et expérimental et leurs résultats au MR-Test (A0 = Groupe expérimental et MR-Test <17 ; A1 = Groupe expérimental et MR-Test >17 ; B0 = Groupe contrôle et MR-Test <17 ; B1 = Groupe contrôle et MR-Test >17)

On retrouve des scores aux QCM initiaux plus faibles dans les groupes qui ont moins réussi le MR-Test ( $>$  ou  $<$  17), avec 6.8 (groupe EXPE) et 5.5 (groupe CTRL) contre 8.3 (groupe EXPE) et 8 (groupe CTRL), sans que cela ne soit significatif ( $p=0.164$ ).

En revanche, les groupes qui ont le moins réussi le MR-Test sont ceux qui ont le plus progressé, avec une amélioration de 1.9 (groupe EXPE) et de 2.4 (groupe CTRL) contre 1.2 (groupe EXPE) et 0.1 (groupe CTRL), sans significativité également ( $p=0.237$ ).



**Figure 41** : Analyses statistiques (diagramme en boîte) des résultats aux QCM initiaux, finaux et de la différence entre QCM initial-QCM final, selon les groupes contrôle et expérimental et leurs résultats au MR-Test (A0 = Groupe expérimental et MR-Test  $<$ 17 ; A1 = Groupe expérimental et MR-Test  $>$ 17 ; B0 = Groupe contrôle et MR-Test  $<$ 17 ; B1 = Groupe contrôle et MR-Test  $>$ 17).

## Satisfaction

Les 60 étudiants ont tous rempli le questionnaire. Il n'y avait pas de données manquantes.

	0 (N=28)	1 (N=32)	Total (N=60)	p value
<b>Durée</b>				0.132 <sup>1</sup>
Mean (SD)	5.9 (1.1)	5.5 (1.0)	5.7 (1.1)	
Range	3.0 - 8.0	2.0 - 7.0	2.0 - 8.0	
<b>Valeur pédagogique</b>				0.642 <sup>1</sup>
Mean (SD)	8.7 (1.4)	8.5 (1.5)	8.6 (1.5)	
Range	5.0 - 10.0	4.0 - 10.0	4.0 - 10.0	
<b>Cours</b>				0.207 <sup>1</sup>
Mean (SD)	8.0 (1.8)	8.5 (1.6)	8.3 (1.7)	
Range	3.0 - 10.0	5.0 - 10.0	3.0 - 10.0	
<b>Serious Game</b>				0.233 <sup>1</sup>
Mean (SD)	8.5 (1.5)	9.0 (1.3)	8.8 (1.4)	
Range	4.0 - 10.0	5.0 - 10.0	4.0 - 10.0	
<b>Expérimentation</b>				0.065 <sup>1</sup>
Mean (SD)	7.4 (2.3)	8.3 (1.8)	7.9 (2.1)	
Range	3.0 - 10.0	3.0 - 10.0	3.0 - 10.0	
<b>Satisfaction</b>				0.408 <sup>1</sup>
Mean (SD)	8.4 (1.0)	8.7 (1.3)	8.6 (1.2)	
Range	7.0 - 10.0	4.0 - 10.0	4.0 - 10.0	

1. Linear Model ANOVA

**Figure 42** : Analyse statistique de la satisfaction des étudiants sur la durée, la valeur pédagogique ressentie, la partie cours, la partie « *serious game* », la partie exploration libre et la satisfaction globale, selon les groupes. (0 = groupe contrôle, 1 = groupe expérimental).

Nous avons analysé la satisfaction par groupe :

- de la durée du test : note de 5.7/10 de moyenne, sans différence entre les groupes,
- de la valeur pédagogique ressentie, note de 8.6/10 de moyenne sans différence entre les groupes.

L'évaluation des différentes phases de l'expérimentation montre des notes légèrement supérieures pour le groupe expérimental, mais sans que cela ne soit significatif.

Enfin, la satisfaction globale est très bonne, de 8.6/10 de moyenne.

## Charge mentale

	0 (N=28)	1 (N=32)	Total (N=60)	p value
<b>mental requirement</b>				0.987 <sup>1</sup>
Mean (SD)	70.7 (16.1)	70.8 (15.7)	70.8 (15.8)	
Range	20.0 - 100.0	25.0 - 100.0	20.0 - 100.0	
<b>physical requirement</b>				0.256 <sup>1</sup>
Mean (SD)	10.2 (10.1)	13.6 (12.2)	12.0 (11.3)	
Range	0.0 - 40.0	0.0 - 60.0	0.0 - 60.0	
<b>temporal requirement</b>				0.128 <sup>1</sup>
Mean (SD)	34.6 (25.1)	25.1 (22.7)	29.5 (24.1)	
Range	0.0 - 80.0	0.0 - 75.0	0.0 - 80.0	
<b>performance</b>				0.251 <sup>1</sup>
Mean (SD)	51.1 (22.4)	57.3 (19.0)	54.5 (20.7)	
Range	7.0 - 90.0	20.0 - 100.0	7.0 - 100.0	
<b>effort</b>				0.705 <sup>1</sup>
Mean (SD)	59.1 (20.6)	61.1 (19.1)	60.2 (19.7)	
Range	6.0 - 100.0	10.0 - 100.0	6.0 - 100.0	
<b>frustration</b>				0.297 <sup>1</sup>
Mean (SD)	40.0 (25.6)	47.2 (27.1)	43.8 (26.4)	
Range	5.0 - 90.0	0.0 - 90.0	0.0 - 90.0	
<b>MD</b>				0.915 <sup>1</sup>
Mean (SD)	4.6 (0.6)	4.6 (0.7)	4.6 (0.6)	
Range	3.0 - 5.0	2.0 - 5.0	2.0 - 5.0	
<b>PD</b>				0.024 <sup>1</sup>
Mean (SD)	0.3 (0.7)	0.9 (1.1)	0.6 (1.0)	
Range	0.0 - 3.0	0.0 - 4.0	0.0 - 4.0	
<b>TD</b>				0.209 <sup>1</sup>
Mean (SD)	2.5 (1.2)	2.1 (1.1)	2.3 (1.1)	
Range	0.0 - 5.0	0.0 - 4.0	0.0 - 5.0	
<b>P</b>				0.597 <sup>1</sup>
Mean (SD)	3.4 (1.0)	3.2 (1.1)	3.3 (1.0)	
Range	1.0 - 5.0	1.0 - 5.0	1.0 - 5.0	
<b>E</b>				0.776 <sup>1</sup>
Mean (SD)	2.9 (1.0)	2.8 (1.0)	2.8 (1.0)	
Range	1.0 - 5.0	0.0 - 4.0	0.0 - 5.0	
<b>F</b>				0.875 <sup>1</sup>
Mean (SD)	1.3 (1.1)	1.4 (1.5)	1.4 (1.3)	
Range	0.0 - 4.0	0.0 - 5.0	0.0 - 5.0	
<b>total</b>				0.601 <sup>1</sup>
Mean (SD)	265.8 (69.9)	275.1 (66.2)	270.8 (67.6)	
Range	103.0 - 395.0	75.0 - 395.0	75.0 - 395.0	

1. Linear Model ANOVA

**Figure 43** : Analyse statistique des données du questionnaires NASA-TLX par groupe. (0 = groupe contrôle, 1 = groupe expérimental).

Les résultats du questionnaire NASA-TLX ont été obtenus en se basant sur les méthodes des études précédentes (Febiyani, 2021).

- 0 – 20 : très basse
- 21 – 40 : basse
- 41 – 60 : modérée
- 61 – 80 : haute
- 81 – 100 : Très haute

La première partie du NASA TLX a montré des médianes de 70.8 ( $\pm$  15.8) pour l'exigence mentale, 12 ( $\pm$  11.3) pour l'exigence physique, 29.5 ( $\pm$  24.1) pour l'exigence temporelle, 54.5 ( $\pm$  20,7) pour la performance, 60.2 ( $\pm$  19.7) pour l'effort et 43.8 ( $\pm$  26.4) pour la frustration.

L'exigence mentale était identique dans les 2 groupes (haute), l'exigence physique supérieure dans le groupe expérimental (mais restant très faible), et l'exigence temporelle supérieure dans le groupe contrôle (mais restant faible).

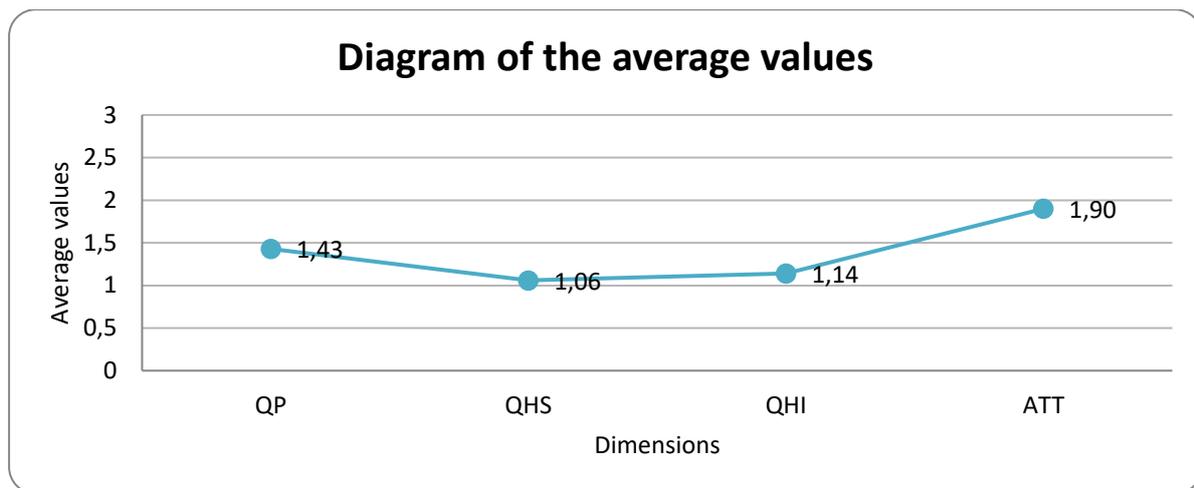
Aucune de ces données n'était statistiquement significative.

Dans la deuxième partie du NASA-TLX, il n'y avait pas d'association statistiquement significative avec les exigences mentale et temporelle, la performance, l'effort ou la frustration entre les deux groupes. On retrouvait en revanche une perception d'exigence physique plus importante dans le groupe expérimental, de manière significative ( $p=0.024$ ) ce qui n'était pas étonnant.

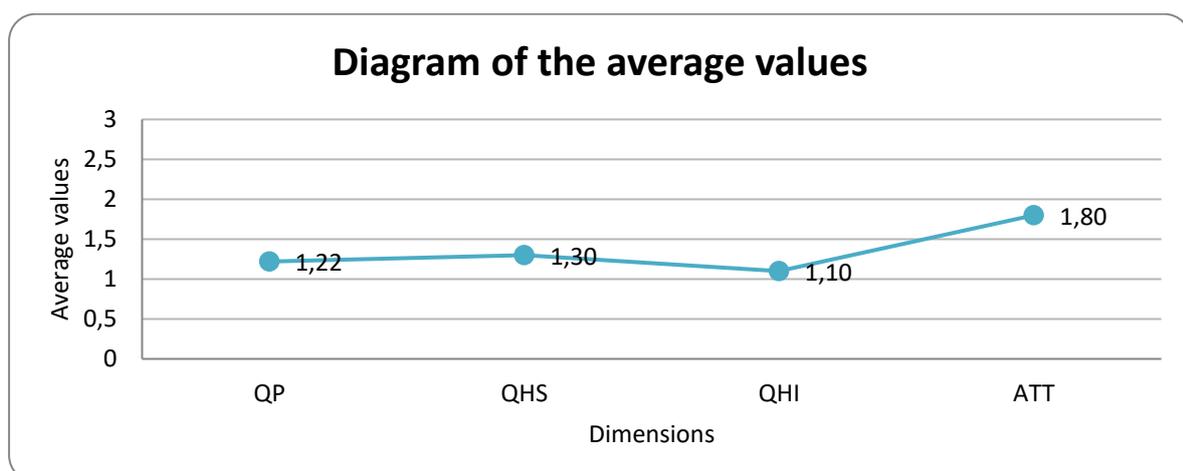
## Outil numérique

Le questionnaire Attrakdiff a été rempli par les 60 participants de l'étude et les résultats ont été intégrés dans le modèle d'Hassenzahl (Hassenzahl, 2003).

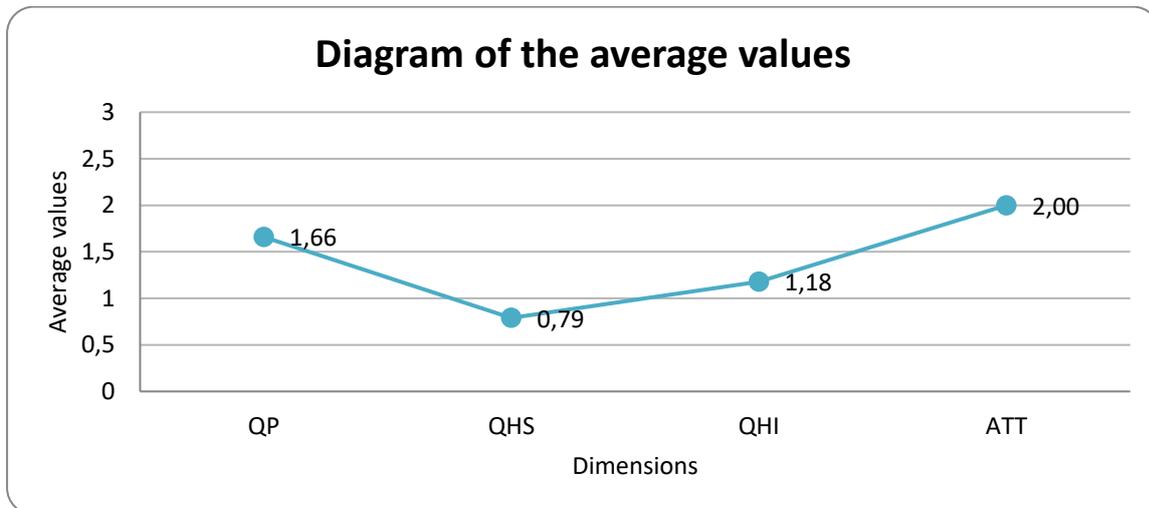
Ce modèle intègre l'évaluation du logiciel à travers 4 dimensions : la Qualité Pragmatique, la Qualité Hédonique (Stimulation et Identité) et l'Attractivité sur une échelle de -3 à +3 avec une zone neutre entre 0 et 1.



**Figure 44** : Valeurs moyennes des qualités pragmatiques, hédoniques et de l'attractivité, selon l'échelle AttrakDiff, pour l'ensemble des étudiants.



**Figure 45** : Valeurs moyennes des qualités pragmatiques, hédoniques et de l'attractivité, selon l'échelle AttrakDiff, pour le groupe expérimental.



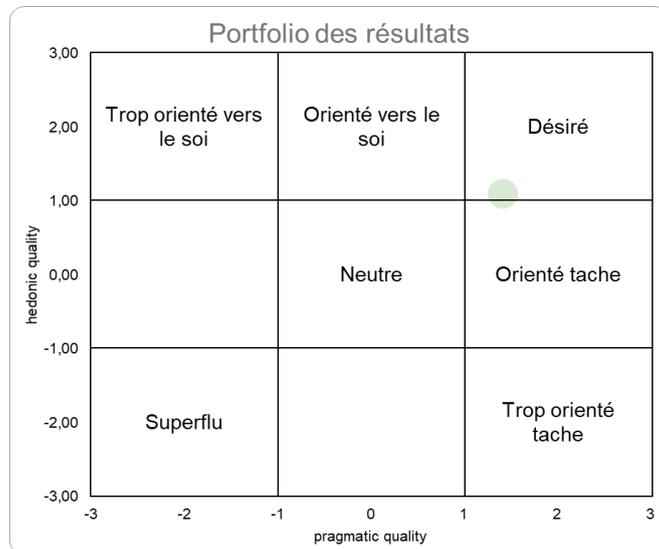
**Figure 46** : Valeurs moyennes des qualités pragmatiques, hédoniques et de l'attractivité, selon l'échelle AttrakDiff, pour le groupe contrôle.

Qualité pragmatique	Technique																	Humain	QP_1	0,32	
	Complicé																		Simple	QP_2	1,50
	Pas pratique																		Pratique	QP_3	1,67
	Fastidieux																		Efficace	QP_4	1,50
	Imprévisible																		Prévisible	QP_5	1,32
	Confus																		Clair	QP_6	1,95
	Incontrôlable																		Maîtrisable	QP_7	1,73
Qualité hédonique-stimulation	Conventionnel																		Original	QHS_1	1,13
	Sans imagination																		Créatif	QHS_2	1,20
	Prudent																		Audacieux	QHS_3	0,65
	Conservateur																		Novateur	QHS_4	1,18
	Ennuyeux																		Captivant	QHS_5	1,50
	Peu exigeant																		Challengeant	QHS_6	0,40
	Commun																		Nouveau	QHS_7	1,35
Qualité hédonique-identification	Missole																		Me sociabilise	QHI_1	0,22
	Amateur																		Professionnel	QHI_2	1,23
	De mauvais goût																		De bon goût	QHI_3	2,07
	Bas de gamme																		Haut de gamme	QHI_4	1,05
	M'exclut																		M'intègre	QHI_5	0,88
	Me sépare des autres																		Me rapproche des autres	QHI_6	0,45
	Non présentable																		Présentable	QHI_7	2,07
Attractivité globale	Déplaisant																		Plaisant	ATT_1	2,33
	Laid																		Beau	ATT_2	1,20
	Désagréable																		Agréable	ATT_3	1,97
	Rebutant																		Attirant	ATT_4	1,78
	Mauvais																		Bon	ATT_5	2,08
	Respoussant																		Attrayant	ATT_6	1,73
	Décourageant																		Motivant	ATT_7	2,17

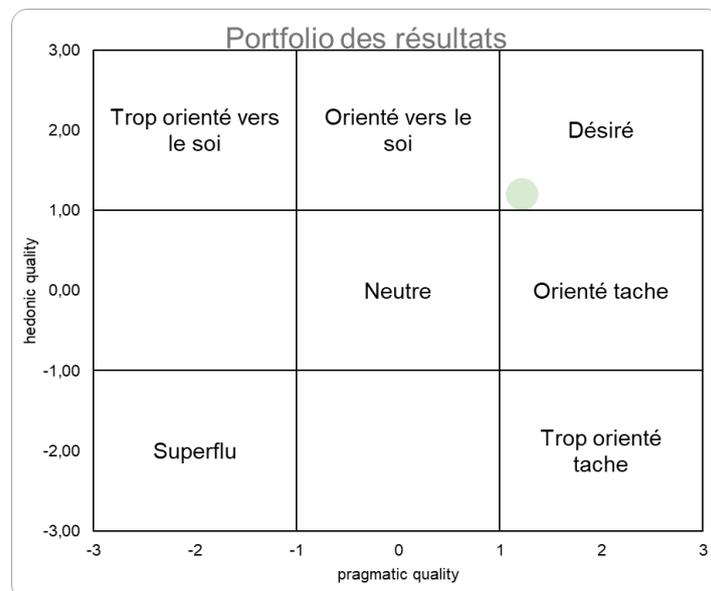
**Figure 47** : Diagramme des paires de mots montrant les forces et les faiblesses de l'outil

La présentation du portefeuille offre une représentation visuelle des actifs logiciels d'An@tomy2020.

Dans la présentation du portefeuille, nous pouvons voir la haute qualité pragmatique du logiciel An@tomy2020 avec un logiciel qui est « désiré » par les étudiants.

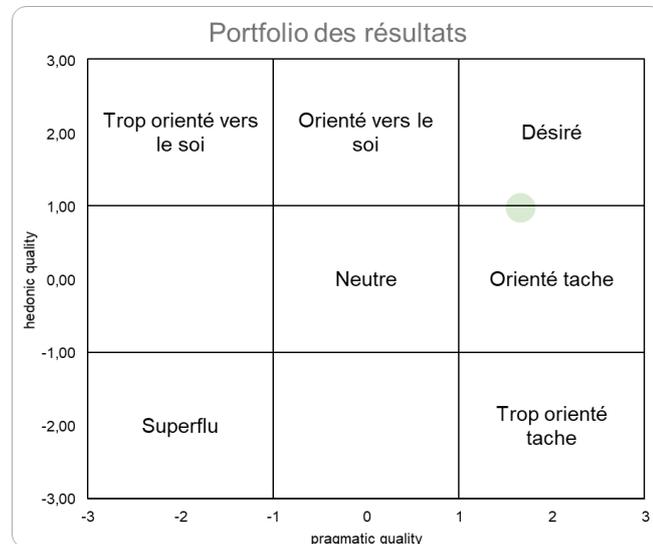


**Figure 48** : Portfolio des résultats pour l'ensemble des étudiants, combinant de bonnes qualités hédoniques et pragmatiques, retrouvant un outil « désiré ».



**Figure 49** : Portfolio des résultats pour le groupe expérimental, combinant de bonnes qualités hédoniques et pragmatiques, retrouvant un outil « désiré ».

Dans le groupe contrôle, l'évaluation par les étudiants place le logiciel comme plus "orienté tâche", avec des qualités hédoniques légèrement moindres (**Figure 50**).



**Figure 50** : Portfolio des résultats pour le groupe contrôle, combinant de bonnes qualités hédoniques et pragmatiques, retrouvant un outil « orienté tâche ».

### 5.3 DISCUSSION

Nous avons donc conduit deux études qui présentaient des niveaux d'incarnation élevés selon Skulmowski (Skulmowski and Rey, 2018), par engagement moteur fort et intégration à la tâche importante (congruence corporelle).

Plusieurs études ont déjà montré que le fait de faire des mouvements semblait corrélé avec une meilleure réussite aux examens à long terme (Cherdieu et al., 2017; Dickson and Stephens, 2015; Macken and Ginns, 2014; Smyth et al., 2021; Yohannan et al., 2022), notamment lors d'apprentissage avec une congruence corporelle haute (Cook et al., 2013; Goodrich and Hudson Kam, 2009).

Dans notre première étude, les étudiants qui avaient effectué l'apprentissage incarné ont eu un impact pédagogique positif à long terme sur l'apprentissage de l'anatomie fonctionnelle, par rapport à ceux qui avaient bénéficié de l'apprentissage traditionnel. Dans notre seconde étude, le groupe qui a bénéficié de l'apprentissage incarné s'est plus amélioré sur les QCM finaux, avec une progression de 1.7 points/20, comparativement au groupe contrôle qui a progressé de 0.9 points/20, mais sans que cela ne soit significatif ( $p=0.390$ ). Ces résultats peuvent être en lien avec le fait qu'il s'agissait d'un programme complet dans la première étude (24 séances de 2h pour la partie en mouvement), alors que dans la seconde, il s'agissait d'une expérimentation sur une courte durée (une heure trente, questionnaires compris). De plus, les étudiants de STAPS étaient évalués sur les examens qui comptaient pour les notes facultaires, contrairement aux étudiants de médecine qui effectuaient cette expérimentation sans qu'elle ne compte pour leur année, stimulant peut être moins la réactivation des connaissances et le besoin de révisions.

Certains auteurs affirment que de meilleurs résultats d'apprentissage sont observés lorsqu'une forme intégrée d'incarnation est accompagnée d'un niveau élevé de congruence avec le contenu (Cook et al., 2013; Goodrich and Hudson Kam, 2009). Cela peut être expliqué par le fait que l'engagement corporel en congruence avec le contenu à apprendre pourrait alléger la charge cognitive des élèves (Johnson-Glenberg and Megowan-Romanowicz, 2017; Yohannan et al., 2022). Dans le groupe expérimental de notre première étude, l'incarnation était parfaitement congruente avec le contenu (mouvement de la jambe pour anatomie de la jambe). En revanche, notre seconde étude correspondait également à un niveau de congruence élevée (mouvements du genou en lien avec l'apprentissage de l'anatomie du genou) mais sans que cela n'augmente les performances. Une des limites est que les étudiants n'ont pas été évalués de manière distinctive sur des QCM d'anatomie descriptive, spatiale et fonctionnelle.

Un point pédagogique important est la baisse significative des performances en lien avec le temps, d'autant plus que les connaissances n'ont pas été réactivées (Dayal et al., 2017). Dans notre première étude, le groupe expérimental a moins perdu de connaissances sur le long terme que le groupe contrôle, par un renforcement de l'encodage de la mémoire motrice (Masumoto et al., 2006), comme l'ont montré Johnson-Glenberg et al. (Johnson-Glenberg et al., 2014).

Les résultats de notre première étude sont contradictoires avec ceux de Smyth (Smyth et al., 2021), qui a montré que l'apprentissage incarné était associé à une meilleure rétention à court terme. Mais il évaluait dans cette étude les résultats sur des applications cliniques. Notre étude portait sur l'apprentissage d'une anatomie fonctionnelle, probablement particulièrement adapté à un apprentissage incarné, qui permettait un renforcement par un encodage moteur de la mémoire, et rendant ces deux études difficilement comparables.

Pour ce qui est du niveau d'incarnation, il est intéressant de noter que même si nos groupes contrôles n'étaient pas décrits comme effectuant un apprentissage incarné, il existait une part d'incarnation. En effet, comme indiqué par Skulmowski et Rey (Skulmowski and Rey, 2018), l'observation d'une action peut correspondre à un faible niveau d'incarnation. Dans notre première étude, les étudiants visionnaient des vidéos de mouvements, et cela pourrait correspondre à un niveau d'incarnation faible. Dans la deuxième étude, les étudiants du groupe contrôle étaient debout, face à un écran géant, et interagissaient avec une manette de jeu vidéo. La comparaison entre nos deux groupes serait finalement une comparaison de deux niveaux d'incarnation différents.

Nous n'avons pas retrouvé dans notre seconde étude de diminution de la charge mentale dans le groupe expérimental, qui aurait pu laisser supposer que le mouvement

l'aurait allégé. Cela est peut-être dû au fait qu'un niveau élevé d'engagement corporel a parfois été décrit comme augmentant la charge mentale, avec un risque de surcharge cognitive (Skulmowski et al., 2016; Song et al., 2014), et que les étudiants qui utilisaient l'outil pour la première fois, devaient intégrer le mouvement de leur membre inférieur avec celui de l'utilisation de la manette.

D'un point de vue de la charge mentale (NASA-TLX), dans notre seconde étude, l'utilisation de l'application entraînait une charge mentale haute (70.8/100) comparable dans les 2 groupes, une exigence physique très basse (12/100) et une exigence temporelle basse (29.5/100). Il n'y avait pas de différence entre les groupes. On retrouvait une perception d'exigence physique statistiquement supérieure dans le groupe expérimental ( $p= 0.024$ ), en lien avec le fait de devoir bouger sa jambe pendant l'utilisation du logiciel. L'exigence mentale élevée est en lien avec la densité de l'expérimentation. En effet, il s'agit d'une expérimentation avec un nombre et une diversité des tâches importantes : questionnaires, quizz, cours, scores à remplir. L'utilisation du logiciel demande en outre une bonne concentration, pour d'une part lire et analyser les informations sur l'écran, et d'autre part, bouger sa jambe, diriger les mouvements de l'avatar avec la manette...

Cela a pu influencer la non significativité des résultats de l'étude, par une surcharge cognitive, perturbant la mémorisation de l'apprentissage.

Il est également très intéressant de noter qu'en analysant les groupes selon leurs résultats au MR-Test, on a pu retrouver une meilleure amélioration aux QCM finaux chez les étudiants qui avaient le moins de compétences visuo-spatiales, et cela dans les 2 groupes (résultats non significatifs  $p=0.073$ ). Il est donc probable que l'apprentissage, à l'aide d'outils numériques comportant ou non des fonctions d'incarnation, permette aux étudiants ayant le plus de difficultés tridimensionnelles de bénéficier le plus de ce type d'apprentissage.

L'utilisation de l'application, qui était en 3D interactive, a bénéficié de manière plus importante à la rétention à long terme des étudiants qui avaient des difficultés visuo-spatiales.

Le développement d'un outil numérique en 3D, interactif et permettant l'incarnation, est intéressant dans ce travail, car on retrouve, malgré un niveau de satisfaction toujours élevé, une absence d'impact pédagogique, contrairement au développement d'un apprentissage incarné au sein d'une salle de classe, en condition écologique, sans logistique technique et financière importante. Notre travail a étudié deux protocoles différents, l'un avec un coût très faible et une facilité de mise en œuvre (classe réelle, apprentissage en groupe, changement de disposition du mobilier, absence d'outils numériques coûteux) dont les résultats sont probants sur l'anatomie fonctionnelle, et le second avec une technologie coûteuse et une logistique importante (logiciel d'anatomie, caméra de capture de mouvement, étudiant expérimentant un par un) comme dans les études (Hoang et al., 2017; Jain et al., 2017; Weyhe et al., 2018), mais dont les résultats ne sont pas significatifs.

Ces nouveaux moyens pédagogiques, qu'ils intègrent de nouveaux outils pédagogiques ou de nouvelles technologies, semblent, dans tous les cas, plaire aux étudiants. D'une manière globale, dans notre seconde étude, les étudiants étaient très satisfaits de l'expérimentation, qu'elle soit incarnée ou non, avec des scores de satisfaction globale de 8.6/10. Les étudiants sont donc motivés et satisfaits de l'utilisation de ce type d'outils pédagogiques, et cela peut être une bonne stimulation pour l'apprentissage d'une matière en augmentant la motivation qui renforce le domaine affectif des tâches d'apprentissage. Dans des études précédentes, on retrouve le même attrait positif pour l'utilisation de nouveaux outils pédagogiques.

Le questionnaire Attrakdiff a montré que l'utilisation de l'incarnation dans le logiciel le place à un endroit plus "désiré" que le logiciel sans l'incarnation qui était très légèrement plus "orienté vers la tâche".

Le résultat de notre première étude, au sein d'une classe entière, peut avoir favorisé l'interaction entre élèves, la collaboration et la motivation de l'apprentissage, contrairement à notre deuxième étude où les étudiants effectuaient le protocole seuls. Il a été démontré que le travail collaboratif augmentait l'impact positif sur les résultats d'apprentissage (Brooks et al., n.d.; Chaker and Njingang Mbadjoin, 2020).

## **LIMITES**

Nos limites sont essentiellement méthodologiques :

Notre première étude souffre de l'absence de recueil de la satisfaction des étudiants et de la charge mentale.

Notre seconde étude bénéficie d'une évaluation sous forme de QCM, mais sans distinction des connaissances descriptives, spatiales et fonctionnelles. Il aurait été intéressant d'analyser l'effet de l'incarnation sur chaque type de connaissances, ainsi que de diversifier les évaluations sous d'autres formes que les QCM. L'évaluation aurait pu intégrer également les éléments du domaine affectif (Hartley et al., 2018), par le biais de questionnaires dédiés (Cale et al., n.d.).

Les limites techniques pour la mise en œuvre écologique du logiciel au sein d'un cursus pédagogique est le fait qu'un seul étudiant à la fois peut utiliser le logiciel. Sur des promotions de plusieurs dizaines d'étudiants, cela requiert une importante logistique en termes d'espace et d'enseignants encadrants.

## **6 CONCLUSIONS**

Nous avons, par ce travail, enrichi les connaissances sur cette nouvelle méthode pédagogique qu'est l'apprentissage incarné. Nos études suggèrent que l'apprentissage incarné est bénéfique à l'apprentissage de l'anatomie fonctionnelle et qu'il permet une meilleure rétention à long terme. Nous avons également démontré que ce type d'enseignement par un logiciel de visualisation en 3D, avec ou sans incarnation, peut apporter un bénéfice aux étudiants ayant le moins de compétences visuo-spatiales.

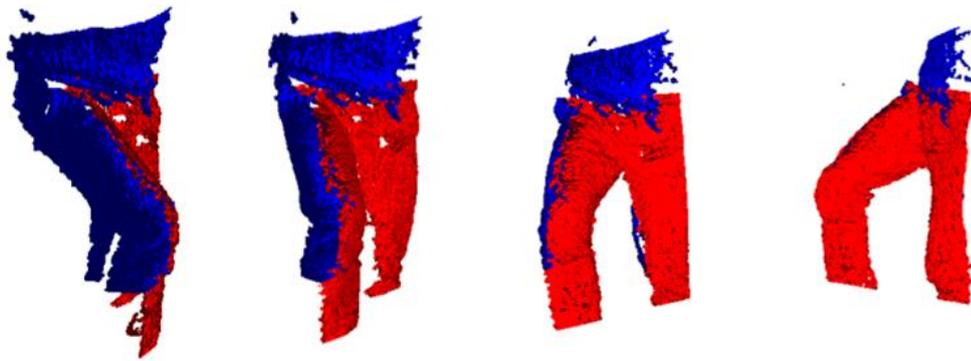
Le développement d'outils pédagogiques innovants est, quoiqu'il en soit, une réponse aux défis rencontrés dans l'apprentissage de l'anatomie, grâce à l'aide à la visualisation en 3D qu'elle apporte et de par son intégration possible dans un enseignement en « distanciel ».

Ces outils sont, en grande majorité, bien accueillis par les étudiants et cette approche incarnée de l'apprentissage de l'anatomie permet son approche plus ludique, augmentant la motivation des étudiants, sans augmenter les exigences mentales ou physiques.

### **Perspectives**

Les futures recherches sur l'incarnation en Anatomie se devront de définir avec précision les niveaux d'engagement corporel et de congruence corporelle ; de définir avec soin les groupes contrôles ; d'évaluer les différents types de connaissances de manière séparée (Descriptive, spatiale, fonctionnelle) ainsi que les sous-catégories des domaines cognitif, affectif et psychomoteur, et de prendre en compte la charge cognitive et le degré d'interactivité.

Les perspectives de notre travail sont de développer l'application pour la généraliser à l'ensemble du corps humain. Cela passera par une amélioration matérielle, avec une association de caméras de capture de mouvement, pour permettre un recalage plus fin, de manière circonférentielle, autour de l'étudiant (**Figure 51**) et d'augmenter le sentiment d'immersion perçue par l'utilisation d'un casque de réalité virtuelle (**Figure 52**).



**Figure 51** : Exemple de fusion des images de profondeur de deux caméras par calibration extrinsèque de l'une par rapport à l'autre. En rouge, KinectV1 et en bleu, Primesense. ©TIMC.



**Figure 52** : Exemple du logiciel avec casque de réalité virtuelle. Vision de l'utilisateur sur ses propres mouvements (via l'avatar numérique) avec le casque Oculus.

Un tel programme pourrait être utile aux étudiants en médecine, mais également à toutes les spécialités où l'anatomie fonctionnelle a son importance, telle que la kinésithérapie, la kinésiologie, l'ergothérapie etc.

## 7 SOURCES

- Al-Zahrani, A.M., 2015. From passive to active: The impact of the flipped classroom through social learning platforms on higher education students' creative thinking. *British Journal of Educational Technology* 46, 1133–1148. <https://doi.org/10.1111/bjet.12353>
- Anderson, Lorin W, Krathwohl, David R, 2001. A TAXONOMY FOR LEARNING, TEACHING, AND ASSESSING.
- Backhouse, S., Taylor, D., Armitage, J.A., 2019. Is This Mine to Keep? Three-dimensional Printing Enables Active, Personalized Learning in Anatomy. *Anatomical Sciences Education* 12, 518–528. <https://doi.org/10.1002/ase.1840>
- Baepler, P., Walker, J.D., Driessen, M., 2014. It's not about seat time: Blending, flipping, and efficiency in active learning classrooms. *Computers & Education* 78, 227–236. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.06.006>
- Baratz, G., Wilson-Delfosse, A.L., Singelyn, B.M., Allan, K.C., Rieth, G.E., Ratnaparkhi, R., Jenks, B.P., Carlton, C., Freeman, B.K., Wish-Baratz, S., 2019. Evaluating the Anatomage Table Compared to Cadaveric Dissection as a Learning Modality for Gross Anatomy. *Med Sci Educ* 29, 499–506. <https://doi.org/10.1007/s40670-019-00719-z>
- Barmaki, R., Yu, K., Pearlman, R., Shingles, R., Bork, F., Osgood, G.M., Navab, N., 2019. Enhancement of Anatomical Education Using Augmented Reality: An Empirical Study of Body Painting. *Anat Sci Educ* 12, 599–609. <https://doi.org/10.1002/ase.1858>
- Barrows, H.S., Mitchell, D.L., 1975. An innovative course in undergraduate neuroscience. Experiment in problem-based learning with “problem boxes.” *Br J Med Educ* 9, 223–230. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.1975.tb01930.x>
- Barsalou, L.W., 2008. Grounded cognition. *Annu Rev Psychol* 59, 617–645. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Barsalou, L.W., 1999. Perceptual symbol systems. *Behav Brain Sci* 22, 577–609; discussion 610-660. <https://doi.org/10.1017/s0140525x99002149>
- Bates, J., Almekdash, H., Gilchrest-Dunnam, M.J., 2017. The Flipped Classroom: A Brief, Brief History. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-41855-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-41855-1_1)
- Bauer, A., Neog, D.R., Dicko, A.-H., Pai, D.K., Faure, F., Palombi, O., Troccaz, J., 2017. Anatomical augmented reality with 3D commodity tracking and image-space alignment. *Computers and Graphics* 69, 140–153. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2017.10.008>
- Berney, S., Bétrancourt, M., Molinari, G., Hoyek, N., 2015. How spatial abilities and dynamic visualizations interplay when learning functional anatomy with 3D anatomical models. *Anat Sci Educ* 8, 452–462. <https://doi.org/10.1002/ase.1524>
- Bloom, B.S., 1956. Taxonomy of Educational Objectives. Cognitive Domain.
- Brooks, W., Resuehr, D., Zehren, S., n.d. Team-based Learning (TBL) Module for Vertebral Column Anatomy. *MedEdPORTAL* 10, 9733. [https://doi.org/10.15766/mep\\_2374-8265.9733](https://doi.org/10.15766/mep_2374-8265.9733)
- Cabanis, E.A., 2020. L'anatomie, alphabet de la médecine. *Bulletin de l'Académie Nationale de Médecine* 204, 1111–1120. <https://doi.org/10.1016/j.banm.2020.09.032>
- Cale, A.S., Hoffman, L.A., McNulty, M.A., n.d. Promoting metacognition in an allied health anatomy course. *Anatomical Sciences Education* n/a. <https://doi.org/10.1002/ase.2218>
- Chaker, R., Njingang Mbadjoin, T., 2020. Robots scolaires et configuration spatiale de la classe Effets sur les interactions sociales dans le cadre de séquences pédagogiques au CE2, in: *Didapro 8 – DidaSTIC L'informatique, Objets d'enseignements – Enjeux Épistémologiques, Didactiques et de Formation*. Lille, France.
- Cherdiou, M., Palombi, O., Gerber, S., Troccaz, J., Rochet-Capellan, A., 2017. Make Gestures to Learn: Reproducing Gestures Improves the Learning of Anatomical Knowledge More than Just Seeing Gestures. *Front Psychol* 8, 1689. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01689>
- Chimmalgi, M., 2019. Interactive Lecture in the Dissection Hall: Transforming Passive Lecture into a Dynamic Learning Experience. *Anat Sci Educ* 12, 191–199. <https://doi.org/10.1002/ase.1803>

- Cook, S.W., Duffy, R.G., Fenn, K.M., 2013. Consolidation and transfer of learning after observing hand gesture. *Child Dev* 84, 1863–1871. <https://doi.org/10.1111/cdev.12097>
- Cook, S.W., Friedman, H.S., Duggan, K.A., Cui, J., Popescu, V., 2017. Hand Gesture and Mathematics Learning: Lessons From an Avatar. *Cogn Sci* 41, 518–535. <https://doi.org/10.1111/cogs.12344>
- Cook, S.W., Mitchell, Z., Goldin-Meadow, S., 2008. Gesturing makes learning last. *Cognition* 106, 1047–1058. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.04.010>
- Cooper, A.B., Tisdell, E.J., 2020. Embodied aspects of learning to be a surgeon. *Med Teach* 42, 515–522. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2019.1708289>
- Cooper, W.F., 1973. Book Reviews: Harrow, Anita J. *A Taxonomy of the Psychomotor Domain: A Guide for Developing Behavioral Objectives*. New York: David McKay Co., 1972. 190 + x pp. \$2.95. *American Educational Research Journal* 10, 325–327. <https://doi.org/10.3102/00028312010004325>
- Cui, D., Wilson, T.D., Rockhold, R.W., Lehman, M.N., Lynch, J.C., 2017. Evaluation of the effectiveness of 3D vascular stereoscopic models in anatomy instruction for first year medical students. *Anat Sci Educ* 10, 34–45. <https://doi.org/10.1002/ase.1626>
- Dargue, N., Sweller, N., Jones, M.P., 2019. When our hands help us understand: A meta-analysis into the effects of gesture on comprehension. *Psychol Bull* 145, 765–784. <https://doi.org/10.1037/bul0000202>
- Darras, K.E., de Bruin, A.B.H., Nicolaou, S., Dahlström, N., Persson, A., van Merriënboer, J., Forster, B.B., 2018. Is there a superior simulator for human anatomy education? How virtual dissection can overcome the anatomic and pedagogic limitations of cadaveric dissection. *Med Teach* 40, 752–753. <https://doi.org/10.1080/0142159X.2018.1451629>
- Dayal, M., Owens, J., Gibson, W., Strkalj, G., 2017. Anatomical knowledge retention in physiotherapy students: A preliminary assessment. *International Journal of Anatomy and Research* 5.
- Delmas, M.V., n.d. MOTS-CLES : ANATOMIE, ENSEIGNEMENT, DISSECTION, NUMERIQUE KEY-WORDS: ANATOMY, TEACHING, DISSECTION, DIGITAL 17.
- Dickson, K.A., Stephens, B.W., 2015. It’s all in the mime: Actions speak louder than words when teaching the cranial nerves. *Anat Sci Educ* 8, 584–592. <https://doi.org/10.1002/ase.1531>
- Drake, R.L., Pawlina, W., 2014. Multimodal education in anatomy: The perfect opportunity. *Anat Sci Educ* 7, 1–2. <https://doi.org/10.1002/ase.1426>
- Estai, M., Bunt, S., 2016. Best teaching practices in anatomy education: A critical review. *Ann Anat* 208, 151–157. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2016.02.010>
- Evans, D.J.R., Cuffe, T., 2009. Near-peer teaching in anatomy: An approach for deeper learning. *Anatomical Sciences Education* 2, 227–233. <https://doi.org/10.1002/ase.110>
- Evans, D.J.R., Pawlina, W., Lachman, N., 2018. Human skills for human[istic] anatomy: An emphasis on nontraditional discipline-independent skills. *Anatomical Sciences Education* 11, 221–224. <https://doi.org/10.1002/ase.1799>
- Febiyani, A., 2021. Calculation of mental load from e-learning student with NASA TLX and SOFI method | *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri* [WWW Document]. URL <https://e-jurnal.lppmunsera.org/index.php/JSMI/article/view/2789> (accessed 10.7.22).
- Fredon, F., Boisseau, S., Cheyrou, E., Hardy, J., Durand-Fontanier, S., Mabit, C., Valleix, D., 2021. L’enseignement de l’anatomie : approches culturelles et ressenti des étudiants. Une étude internationale. *Morphologie* 105, S35. <https://doi.org/10.1016/j.morpho.2021.05.051>
- Gallagher, S., Lindgren, R., 2015. Enactive Metaphors: Learning Through Full-Body Engagement. *Educational Psychology Review* 27. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9327-1>
- Garg, A.X., Norman, G., Sperotable, L., 2001. How medical students learn spatial anatomy. *Lancet* 357, 363–364. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(00\)03649-7](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(00)03649-7)
- Gillois, P., Bosson, J.L., Genty, C., Vuillez, J.-P., Romanet, J.-P., 2015. The impacts of blended learning design in first year medical studies. *Stud Health Technol Inform* 210, 607–611.
- Gingras, J.-M., 1975. La notion d’objectif pédagogique dans le domaine affectif et son utilité dans l’enseignement du français au collégial. *rse* 1, 113–127. <https://doi.org/10.7202/900011ar>
- Goodrich, W., Hudson Kam, C.L., 2009. Co-speech gesture as input in verb learning. *Dev Sci* 12, 81–87. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00735.x>

- Guillot, A., Champely, S., Batier, C., Thiriet, P., Collet, C., 2007. Relationship between spatial abilities, mental rotation and functional anatomy learning. *Adv Health Sci Educ Theory Pract* 12, 491–507. <https://doi.org/10.1007/s10459-006-9021-7>
- Guimarães, B., Dourado, L., Tsisar, S., Diniz, J.M., Madeira, M.D., Ferreira, M.A., 2017. Rethinking Anatomy: How to Overcome Challenges of Medical Education's Evolution. *Acta Med Port* 30, 134–140. <https://doi.org/10.20344/amp.8404>
- Gunderman, R.B., Wilson, P.K., 2005. Exploring the Human Interior: The Roles of Cadaver Dissection and Radiologic Imaging in Teaching Anatomy. *Academic Medicine* 80, 745–749.
- Hamilton, S.S., Yuan, B.J., Lachman, N., Hellyer, N.J., Krause, D.A., Hollman, J.H., Youdas, J.W., Pawlina, W., 2008. Interprofessional education in gross anatomy: Experience with first-year medical and physical therapy students at Mayo Clinic. *Anatomical Sciences Education* 1, 258–263. <https://doi.org/10.1002/ase.59>
- Hartley, R.S., Smith, G.A., Rosenberg, M.J., 2018. Anatomy integration: Effective change or change of affect? *Anat Sci Educ* 11, 535–546. <https://doi.org/10.1002/ase.1773>
- Hassenzahl, M., 2003. The Thing and I: Understanding the Relationship Between User and Product, in: Blythe, M.A., Overbeeke, K., Monk, A.F., Wright, P.C. (Eds.), *Funology, Human-Computer Interaction Series*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 31–42. [https://doi.org/10.1007/1-4020-2967-5\\_4](https://doi.org/10.1007/1-4020-2967-5_4)
- Hegarty, M., Kriz, S., 2008. Effects of knowledge and spatial ability on learning from animation, in: *Learning with Animation: Research Implications for Design*. Cambridge University Press, New York, NY, US, pp. 3–29.
- Hoang, T.N., Reinoso, M., Joukhadar, Z., Vetere, F., Kelly, D., 2017. Augmented Studio: Projection Mapping on Moving Body for Physiotherapy Education. CHI. <https://doi.org/10.1145/3025453.3025860>
- Hoyek, N., Collet, C., Di Rienzo, F., De Almeida, M., Guillot, A., 2014. Effectiveness of three-dimensional digital animation in teaching human anatomy in an authentic classroom context. *Anat Sci Educ* 7, 430–437. <https://doi.org/10.1002/ase.1446>
- Hoyek, N., Collet, C., Rastello, O., Fargier, P., Thiriet, P., Guillot, A., 2009. Enhancement of mental rotation abilities and its effect on anatomy learning. *Teach Learn Med* 21, 201–206. <https://doi.org/10.1080/10401330903014178>
- Huitt, T.W., Killins, A., Brooks, W.S., 2015. Team-based learning in the gross anatomy laboratory improves academic performance and students' attitudes toward teamwork. *Anat Sci Educ* 8, 95–103. <https://doi.org/10.1002/ase.1460>
- Hutto, D., Kirchoff, M., Abrahamson, D., 2015. The enactive roots of STEM: rethinking educational design in mathematics. *Faculty of Law, Humanities and the Arts - Papers (Archive)* 371–389. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9326-2>
- Iowa State University [WWW Document], n.d. . Center for Excellence in Learning and Teaching. URL <https://www.celt.iastate.edu/> (accessed 10.20.22).
- Iwanaga, J., Loukas, M., Dumont, A.S., Tubbs, R.S., 2021. A review of anatomy education during and after the COVID-19 pandemic: Revisiting traditional and modern methods to achieve future innovation. *Clin Anat* 34, 108–114. <https://doi.org/10.1002/ca.23655>
- Jain, N., Youngblood, P., Hasel, M., Srivastava, S., 2017. An augmented reality tool for learning spatial anatomy on mobile devices. *Clin Anat* 30, 736–741. <https://doi.org/10.1002/ca.22943>
- Jang, S., 2011. From Vesalius to Virtual Reality: How Embodied Cognition Facilitates the Visualization of Anatomy. *BiblioBazaar*.
- Johnson-Glenberg, M.C., Birchfield, D.A., Tolentino, L., Koziupa, T., 2014. Collaborative embodied learning in mixed reality motion-capture environments: Two science studies. *Journal of Educational Psychology* 106, 86–104. <https://doi.org/10.1037/a0034008>
- Johnson-Glenberg, M.C., Megowan-Romanowicz, C., 2017. Embodied science and mixed reality: How gesture and motion capture affect physics education. *Cogn Res Princ Implic* 2, 24. <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0060-9>
- Kalet, A., Song, H.S., Sarpel, U.S., Schwartz, R., Brenner, J., Ark, T.K., Plass, J., 2012. Just enough, but not too much interactivity leads to better clinical skills performance after a computer

- assisted learning module. *Med Teach* 34, 10.3109/0142159X.2012.706727.  
<https://doi.org/10.3109/0142159X.2012.706727>
- Kamphuis, C., Barsom, E., Schijven, M., Christoph, N., 2014. Augmented reality in medical education? *Perspect Med Educ* 3, 300–311. <https://doi.org/10.1007/s40037-013-0107-7>
- Klement, B.J., Paulsen, D.F., Wineski, L.E., 2011. Anatomy as the backbone of an integrated first year medical curriculum: design and implementation. *Anat Sci Educ* 4, 157–169.  
<https://doi.org/10.1002/ase.217>
- Kontra, C., Goldin-Meadow, S., Beilock, S.L., 2012. Embodied learning across the life span. *Top Cogn Sci* 4, 731–739. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2012.01221.x>
- Krych, A.J., March, C.N., Bryan, R.E., Peake, B.J., Pawlina, W., Carmichael, S.W., 2005. Reciprocal peer teaching: students teaching students in the gross anatomy laboratory. *Clin Anat* 18, 296–301.  
<https://doi.org/10.1002/ca.20090>
- Langlois, J., Bellemare, C., Toulouse, J., Wells, G.A., 2017. Spatial abilities and anatomy knowledge assessment: A systematic review. *Anat Sci Educ* 10, 235–241.  
<https://doi.org/10.1002/ase.1655>
- Leung, K.-K., Lue, B.-H., Lu, K.-S., Huang, T.-S., 2006. Students' evaluation on a two-stage anatomy curriculum. *Med Teach* 28, e59-63. <https://doi.org/10.1080/01421590600617251>
- Lin, D.C., Bunch, B., De Souza, R.Z.D., Chen, D., Zhou, J., Zumwalt, A.C., Wisco, J.J., 2022. Effectiveness of Pedagogical Tools for Teaching Medical Gross Anatomy During the COVID-19 Pandemic. *Med Sci Educ* 32, 411–422. <https://doi.org/10.1007/s40670-022-01524-x>
- Macken, L., Ginns, P., 2014. Pointing and tracing gestures may enhance anatomy and physiology learning. *Med Teach* 36, 596–601. <https://doi.org/10.3109/0142159X.2014.899684>
- Masumoto, K., Yamaguchi, M., Sutani, K., Tsuneto, S., Fujita, A., Tonoike, M., 2006. Reactivation of physical motor information in the memory of action events. *Brain Res* 1101, 102–109.  
<https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.05.033>
- McMenamin, P.G., 2008. Body painting as a tool in clinical anatomy teaching. *Anat Sci Educ* 1, 139–144. <https://doi.org/10.1002/ase.32>
- Michaelsen, L., Fink, L., Knight, A., 1997. *Designing Effective Group Activities: Lessons for Classroom Teaching and Faculty Development. To Improve the Academy.*
- Mitrousias, V., Karachalios, T.S., Varitimidis, S.E., Natsis, K., Arvanitis, D.L., Zibis, A.H., 2020. Anatomy Learning from Prosected Cadaveric Specimens Versus Plastic Models: A Comparative Study of Upper Limb Anatomy. *Anat Sci Educ* 13, 436–444. <https://doi.org/10.1002/ase.1911>
- Nandi, P.L., Chan, J.N., Chan, C.P., Chan, P., Chan, L.P., 2000. Undergraduate medical education: comparison of problem-based learning and conventional teaching. *Hong Kong Med J* 6, 301–306.
- Nguyen, N., Nelson, A.J., Wilson, T.D., 2012. Computer visualizations: factors that influence spatial anatomy comprehension. *Anat Sci Educ* 5, 98–108. <https://doi.org/10.1002/ase.1258>
- Nieder, G.L., Parmelee, D.X., Stolfi, A., Hudes, P.D., 2005. Team-based learning in a medical gross anatomy and embryology course. *Clin Anat* 18, 56–63. <https://doi.org/10.1002/ca.20040>
- Novack, M., Goldin-Meadow, S., 2015. Learning from gesture: How our hands change our minds. *Educ Psychol Rev* 27, 405–412. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9325-3>
- Nwachukwu, C., Lachman, N., Pawlina, W., 2015. Evaluating dissection in the gross anatomy course: Correlation between quality of laboratory dissection and students outcomes. *Anat Sci Educ* 8, 45–52. <https://doi.org/10.1002/ase.1458>
- Oh, C.-S., Won, H.-S., Kim, K.-J., Jang, D.-S., 2011. “Digit anatomy”: a new technique for learning anatomy using motor memory. *Anat Sci Educ* 4, 132–141. <https://doi.org/10.1002/ase.223>
- Pawlina, W., Lachman, N., 2004. Dissection in learning and teaching gross anatomy: Rebuttal to McLachlan. *The Anatomical Record Part B: The New Anatomist* 281B, 9–11.  
<https://doi.org/10.1002/ar.b.20038>
- Peterson, D.C., Mlynarczyk, G.S.A., 2016. Analysis of traditional versus three-dimensional augmented curriculum on anatomical learning outcome measures. *Anat Sci Educ* 9, 529–536.  
<https://doi.org/10.1002/ase.1612>

- Ping, R., Church, R.B., Decatur, M.-A., Larson, S.W., Zinchenko, E., Goldin-Meadow, S., 2021. Unpacking the gestures of chemistry learners: What the hands tell us about correct and incorrect conceptions of stereochemistry. *Discourse Process* 58, 213–232. <https://doi.org/10.1080/0163853X.2020.1839343>
- Qualter, J., Sculli, F., Oliker, A., Napier, Z., Lee, S., Garcia, J., Frenkel, S., Harnik, V., Triola, M., 2012. The biodigital human: a web-based 3D platform for medical visualization and education. *Studies in health technology and informatics* 173, 359–61.
- Rabattu, P.-Y., Debarnot, U., Hoyek, N., 2022. Exploring the impact of interactive movement-based anatomy learning in real classroom setting among kinesiology students. *Anat Sci Educ*. <https://doi.org/10.1002/ase.2172>
- Rochford, K., 1985. Spatial learning disabilities and underachievement among university anatomy students. *Med Educ* 19, 13–26. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2923.1985.tb01134.x>
- Rooney, P.J., Kean, W.F., Buchanan, W.W., 1983. McMaster: is this experiment in medical education of any relevance to the Scottish Universities. *Scott Med J* 28, 290–292. <https://doi.org/10.1177/003693308302800315>
- Ruiter, M., Loyens, S., Paas, F., 2015. Watch Your Step Children! Learning Two-Digit Numbers Through Mirror-Based Observation of Self-Initiated Body Movements. *Educ Psychol Rev* 27, 457–474. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9324-4>
- Singh, R., Shane Tubbs, R., Gupta, K., Singh, M., Jones, D.G., Kumar, R., 2015. Is the decline of human anatomy hazardous to medical education/profession?--A review. *Surg Radiol Anat* 37, 1257–1265. <https://doi.org/10.1007/s00276-015-1507-7>
- Skinder-Meredith, A.E., 2010. Innovative activities for teaching anatomy of speech production. *Anat Sci Educ* 3, 234–243. <https://doi.org/10.1002/ase.173>
- Skulmowski, A., Pradel, S., Kühnert, T., Brunnett, G., Rey, G.D., 2016. Embodied learning using a tangible user interface: The effects of haptic perception and selective pointing on a spatial learning task. *Computers & Education* 92, 64–75.
- Skulmowski, A., Rey, G.D., 2018. Embodied learning: introducing a taxonomy based on bodily engagement and task integration. *Cogn Res Princ Implic* 3, 6. <https://doi.org/10.1186/s41235-018-0092-9>
- Smith, C.F., Mathias, H.S., 2011. What impact does anatomy education have on clinical practice? *Clin Anat* 24, 113–119. <https://doi.org/10.1002/ca.21065>
- Smyth, L., Carter, J., Valter, K., Webb, A.L., 2021. Examining the Short-, Medium-, and Long-Term Success of an Embodied Learning Activity in the Study of Hand Anatomy for Clinical Application. *Anatomical Sciences Education* 14, 201–209. <https://doi.org/10.1002/ase.1987>
- Song, H.S., Pusic, M., Nick, M.W., Sarpel, U., Plass, J.L., Kalet, A.L., 2014. The cognitive impact of interactive design features for learning complex materials in medical education. *Comput Educ* 71, 198–205. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2013.09.017>
- Spitzer, V.M., Whitlock, D.G., 1998. The visible human dataset: The anatomical platform for human simulation. *The Anatomical Record* 253, 49–57. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0185\(199804\)253:2<49::AID-AR8>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0185(199804)253:2<49::AID-AR8>3.0.CO;2-9)
- Streiner, D.L., 2003. Starting at the Beginning: An Introduction to Coefficient Alpha and Internal Consistency. *Journal of Personality Assessment* 80, 99–103. [https://doi.org/10.1207/S15327752JPA8001\\_18](https://doi.org/10.1207/S15327752JPA8001_18)
- Sugand, K., Abrahams, P., Khurana, A., 2010. The anatomy of anatomy: a review for its modernization. *Anat Sci Educ* 3, 83–93. <https://doi.org/10.1002/ase.139>
- Tran, C., Smith, B., Buschkuehl, M., 2017. Support of mathematical thinking through embodied cognition: Nondigital and digital approaches. *Cogn Res Princ Implic* 2, 16. <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0053-8>
- Triepels, C.P.R., Koppes, D.M., Van Kuijk, S.M.J., Popeijus, H.E., Lamers, W.H., van Gorp, T., Futterer, J.J., Kruitwagen, R.F.P.M., Notten, K.J.B., 2018. Medical students' perspective on training in anatomy. *Ann Anat* 217, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.aanat.2018.01.006>
- Vandenberg, S.G., Kuse, A.R., 1978. Mental Rotations, a Group Test of Three-Dimensional Spatial Visualization. *Percept Mot Skills* 47, 599–604. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599>

- Weyhe, D., Uslar, V., Weyhe, F., Kaluschke, M., Zachmann, G., 2018. Immersive Anatomy Atlas- Empirical Study Investigating the Usability of a Virtual Reality Environment as a Learning Tool for Anatomy. *Front Surg* 5, 73. <https://doi.org/10.3389/fsurg.2018.00073>
- Wilson, A.D., Golonka, S., 2013. Embodied Cognition is Not What you Think it is. *Front Psychol* 4, 58. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00058>
- Yamine, K., Violato, C., 2015. A meta-analysis of the educational effectiveness of three-dimensional visualization technologies in teaching anatomy. *Anat Sci Educ* 8, 525–538. <https://doi.org/10.1002/ase.1510>
- Yeager, V.L., 1996. Learning gross anatomy: dissection and prosection. *Clin Anat* 9, 57–59. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2353\(1996\)9:1<57::AID-CA12>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2353(1996)9:1<57::AID-CA12>3.0.CO;2-9)
- Yohannan, D.G., Oommen, A.M., Amogh, B.J., Raju, N.K., Suresh, R.O., Nair, S.J., 2022. “Air Anatomy” - Teaching Complex Spatial Anatomy Using Simple Hand Gestures. *Anat Sci Educ* 15, 552–565. <https://doi.org/10.1002/ase.2088>
- Zygote Body 3D Anatomy Online Visualizer | Human Anatomy 3D [WWW Document], n.d. URL <https://www.zygotebody.com/> (accessed 10.6.22).

## 8 ANNEXES

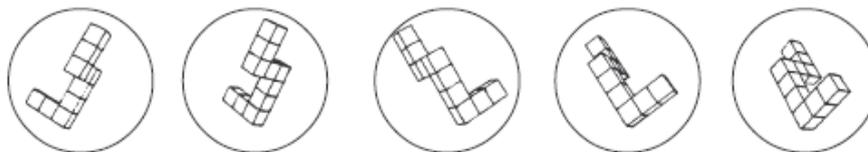
### 8.1 Exemple du test de Rotation mentale MR-Test (phase pré-test).

#### ANNEXE

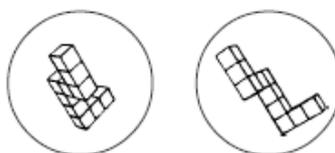
#### *Test de rotation mentale*

adapté par S.G. Vandenberg, université du Colorado, 1971  
consignes révisées par H. Crawford, université du Wyoming, 1979  
traduction française par J.M. Albaret et E. Aubert, 1990

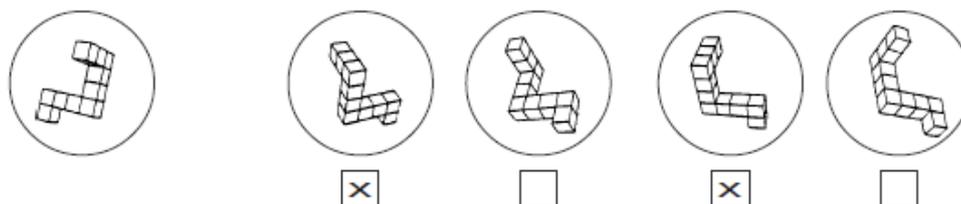
“Ceci est un test destiné à mesurer votre aptitude à reconnaître le dessin d’un objet donné parmi un ensemble d’objets différents. La seule différence entre l’objet original et l’objet à trouver consiste en une modification de l’angle sous lequel il est vu. Une illustration de ce procédé est donnée ci-dessous, où la même figure est présentée dans cinq positions. Regardez chacun d’entre eux pour vous rendre compte vous-même qu’ils sont seulement présentés sous un angle différent l’un de l’autre.”



“Ci-dessous, vous voyez deux dessins d’un nouvel objet. Ils ne peuvent pas être appariés avec les cinq dessins ci-dessus. Notez que vous ne pouvez pas retourner les objets. Voyez vous-mêmes qu’ils sont différents.”



“Maintenant, vous allez faire quelques problèmes en guise d’exemple. Pour chaque problème il y a un premier dessin tout à fait à gauche. Vous devez indiquer parmi les quatre structures à droite, les deux qui sont semblables au modèle donné à gauche. Dans chaque problème, il y a toujours deux dessins semblables à celui de gauche. Mettez un x dans les cases sous les dessins corrects et laissez un blanc dans celles qui sont incorrectes. Le premier exemple est déjà complété.”



“Tournez la page.”

## 8.2 Exemple d'un QCM d'anatomie à 5 propositions, avec image extraite du logiciel.

10°) Quels sont les muscles mise en jeu lors de la flexion de jambe ? \*



- A - Le biceps femoral
- B - Le semi tendineux
- C - Le quadriceps
- D - Le vaste intermédiaire
- E - Toutes les réponses sont fausses

## 8.3 Questionnaire d'évaluation de la charge mentale, NASA-TLX.

Questionnaire NASA TLX

Identifiant (Prénom \ NQm) : .....

Date | \_ | \_ / | \_ | \_ / | \_ | \_ |

ETAPE 1

Pour chaque dimension lisez la question appropriée et renseigner la réponse sur la ligne de l'échelle horizontale

Dimension	Question	Echelle
Exigence mentale	Quelle a été l'importance de l'activité mentale et intellectuelle requise ?	
Exigence physique	Quelle a été l'importance de l'activité physique requise ? (ex. gestes techniques, utilisation de matériel, déplacements, usage des logiciels, etc.)	
Exigence temporelle	Quelle a été l'importance de la pression temporelle causée par la rapidité nécessitée pour l'accomplissement de la tâche ?	
Performance	Quelle réussite pensez-vous avoir eu dans l'accomplissement de votre tâche ?	
Effort	Quel degré d'effort (mentalement ou physiquement) avez-vous dû fournir pour exécuter la tâche demandée ?	
Frustration	Pendant l'exécution du travail vous êtes-vous senti satisfait, relaxé, sûr de vous (niveau de frustration faible), ou plutôt découragé, irrité, stressé, sans assurance (niveau de frustration élevé) ?	

ETAPE 2

Entourez pour chaque couple, la dimension qui reflète le plus votre perception (pression ressentie) sur la réalisation du travail

<u>Effort</u> Performance	Exigence temporelle <u>Frustration</u>	Exigence temporelle <u>Effort</u>	Exigence physique <u>Frustration</u>	Performance <u>Frustration</u>
Exigence physique <u>Exigence temporelle</u>	Exigence physique <u>Performance</u>	Exigence temporelle <u>Exigence mentale</u>	Frustration <u>Effort</u>	Performance <u>Exigence mentale</u>
Performance <u>Exigence temporelle</u>	Exigence mentale <u>Effort</u>	Exigence mentale <u>Exigence physique</u>	Effort <u>Exigence physique</u>	Frustration <u>Exigence mentale</u>

## 8.4 Questionnaire d'évaluation de l'outil numérique (première page), AttrakDiff.

### AttrakDiff - Items 1/3

Humain	<input type="radio"/>	Technique						
M'isole	<input type="radio"/>	Me sociabilise						
Plaisant	<input type="radio"/>	Déplaisant						
Original	<input type="radio"/>	Conventionnel						
Simple	<input type="radio"/>	Compliqué						
Professionnel	<input type="radio"/>	Amateur						
Laid	<input type="radio"/>	Beau						
Pratique	<input type="radio"/>	Pas pratique						
Agréable	<input type="radio"/>	Désagréable						
Fastidieux	<input type="radio"/>	Efficace						

## 8.5 Questionnaire de satisfaction (phase de post-test).

### Questionnaire de satisfaction

#### Données générales

Numéro aléatoire : .....

Cours antérieur d'anatomie : oui non      Etude antérieures : oui non Type : .....

Pratique de jeux vidéo : oui non

Fréquence : 1x/jour 1x/semaine 1x/mois <1x/mois

#### Evaluation globale

Durée : trop court                      adaptée                      trop long

Valeur pédagogique : 0-----10

#### Evaluation spécifique

MR test : 0-----10 (durée, pertinence)

QCM Anatomie n°1 : 0-----10 (durée, pertinence)

Cours genoux : 0-----10 (Ergonomie, durée, difficulté)

*Serious Game* : 0-----10 (Ergonomie, durée, difficulté)

Exploration libre : 0-----10 (Ergonomie, durée, difficulté)

Nombre d'heure de travail personnel : <1h    1 à 5h            5 à 10h            >10h

QCM Anatomie n°2 : 0-----10 (durée, pertinence)

NASA TLX : 0-----10 (durée, pertinence)

AttrakDiff : 0-----10 (durée, pertinence)

Satisfaction globale : 0-----10

## 8.6 Avis favorable du comité d'éthique local.



### CER Grenoble Alpes

#### Comité d'Ethique pour les Recherches Grenoble Alpes

Objet : Avis sur le projet « An@tomy2020 : Outils d'interaction avec le corps pour l'apprentissage actif de l'anatomie » présenté par Olivier Palombi du Laboratoire Laboratoire Jean Kuntzmann Université Grenoble-Alpes à Grenoble.

Compte tenu des éléments fournis dans la demande par Olivier Palombi, le Comité d'Ethique pour les Recherches Grenoble Alpes émet un AVIS FAVORABLE.

Il relève de la responsabilité des chercheurs de se conformer à leurs obligations légales notamment en ce qui concerne la loi Jardé (voir les articles L. 1121-1 et suivants du Code de la santé publique), les aspects informatiques et libertés, l'homologation du lieu de recherche, ou encore les mesures sanitaires mises en œuvre sur le lieu de recherche.

Numéro de l'avis : CERGA-Avis-2021-17

A Grenoble, le 22/05/2021

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'Carole Peyrin', written over a horizontal line.

La Présidente du CER Grenoble Alpes,

Carole Peyrin

Université Grenoble Alpes

## 8.7 Document d'information et de consentement éclairé.



### **Document d'information et de consentement pour étude An@tomy2020**

### **Outils d'interaction avec le corps pour l'apprentissage actif de l'anatomie**

Responsable

---

Pierre-Yves RABATTU, Praticien Hospitalo-Universitaire

Laboratoire d'anatomie des Alpes Françaises - Université Grenoble Alpes

Service de Chirurgie Pédiatrique – CHU de Grenoble Alpes

Tel : 04-76-76-59-00

[Pyrabattu@chu-grenoble.fr](mailto:Pyrabattu@chu-grenoble.fr)

Lieu de recherche

---

Laboratoire d'Anatomie des Alpes Françaises – LADAF

Faculté de Médecine, Domaine de la Merci. 38700 La Tronche

Tel : 04-76-63-71-49

## But

---

L'objectif principal est d'évaluer le bénéfice sur l'apprentissage de l'anatomie de l'*embodiment*, c'est-à-dire de l'incarnation, au travers d'une application numérique interactive animée par votre propre corps

## Méthodologie

---

Cette étude comporte une partie préliminaire avec un exercice de rotation mentale (MR-Test), de chronométrie mentale et 10 QCM d'anatomie.

Puis un cours sur le genou sur ordinateur vous sera délivré, soit devant un écran d'ordinateur avec interaction via une souris, soit devant un écran avec interaction via votre propre corps et une manette de jeux vidéo, selon la randomisation.

La partie finale comportera un questionnaire d'évaluation de l'outil numérique (Attrakdiff), un questionnaire de charge mentale (NASA TLX) et un questionnaire de satisfaction.

L'ensemble de l'expérimentation se fera sur une durée d'environ une heure trente.

## Vos droits de vous retirer de la recherche en tout temps

---

Votre contribution est volontaire. Vous pouvez vous retirer de l'étude à tout instant. Votre décision de participer, de refuser ou de cesser votre participation n'aura aucun effet sur vos notes, votre statut ou vos relations avec le Laboratoire d'Anatomie des Alpes Françaises ou l'université de Grenoble-Alpes

## Vos droits à la confidentialité et au respect de la vie privée

---

Les données recueillies durant cette étude seront traitées avec la plus grande confidentialité. Votre identité sera anonymisée à l'aide d'un numéro aléatoire et aucun autre renseignement ne sera dévoilé qui puisse révéler votre identité. Toutes les données seront gardées dans un endroit sécurisé et seuls le responsable scientifique et les chercheurs adjoints y auront accès. Le strict anonymat rend impossible la rectification ou la suppression des informations vous concernant après la fin de votre participation

## Bénéfices

---

Les avantages de cette étude seraient d'améliorer les méthodes pédagogiques en anatomie, en utilisant les outils numériques innovants et des méthodes pédagogiques innovantes.

## Risques

---

À notre connaissance, cette recherche n'implique aucun risque ou inconfort autre que ceux de la vie quotidienne

## Diffusion

---

Cette recherche sera diffusée dans des colloques d'anatomie et elle sera publiée dans des articles de revue académique

## Vos droits de poser des questions en tout temps

---

Vous pouvez poser des questions au sujet de la recherche en tout temps en communiquant avec le responsable scientifique du projet soit directement lors de l'expérimentation, soit par courrier électronique à [pyrabattu@chu-grenoble.fr](mailto:pyrabattu@chu-grenoble.fr).

## Consentement à la participation

---

En signant le formulaire de consentement, vous certifiez que vous avez lu et compris les renseignements ci-dessus, qu'on a répondu à vos questions de façon satisfaisante et qu'on vous a avisé que vous étiez libre d'annuler votre consentement ou de vous retirer de cette recherche en tout temps, sans préjudice.

## **A remplir par le participant**

**J'ai lu et compris les renseignements ci-dessus et j'accepte de plein gré de participer à cette recherche. Nom, Prénom – Date – Signature**

Un exemplaire de ce document vous est remis, un autre exemplaire est conservé dans le dossier.

## 8.8 Liste des éléments de communication et de publications

### Journaux internationaux avec comités de lecture

- **Rabattu, P-Y**, Debarnot, U, Hoyek, N. 2022. Exploring the impact of interactive movement-based anatomy learning in real classroom setting among kinesiology students. *Anat Sci Educ* 00: 1– 9. <https://doi.org/10.1002/ase.2172>
- **Rabattu, P-Y**, Hoyek, N, Bellier, A, Sole Cruz, E, Palombi, O. Exploring the impact of embodiement on anatomy learning among medical students. *En projet*

### Thèse

- **PY Rabattu**, 2022. An@tomy2020, Outil d'interaction avec le corps pour l'apprentissage actif de l'Anatomie. Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble Alpes, Décembre 2022 – encadrants : Olivier Palombi, Nady El Hoyek.

### Congrès

- **PY Rabattu**. 102e Congrès de l'Association des Morphologistes, En Ligne, Mars 2021.
- **PY Rabattu**. 103e Congrès de l'Association des Morphologistes, Annecy, Mars 2022.
- **PY Rabattu**. Journées de la Recherche Médicales, Grenoble, Juin 2022.