

Université Fédérale



THÈSE

En vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l'Université Toulouse 2 - Jean Jaurès

Présentée et soutenue par

Didier BLANQUI

Le 24 mars 2020

**Le rôle du geste lors d'une interaction Multitouch, sur
l'apprentissage, et son lien avec les habiletés visuo-spatiales.**

Ecole doctorale : **CLESCO - Comportement, Langage, Education, Socialisation,
Cognition**

Spécialité : **Ergonomie**

Unité de recherche :

CLLE - Unité Cognition, Langues, Langage, Ergonomie

Thèse dirigée par

Franck AMADIEU et Claudette MARINE

Jury

M. Jean-Michel BOUCHEIX, Rapporteur

M. Éric JAMET, Rapporteur

Mme Mireille BETRANCOURT, Examinatrice

Mme Claudette MARINE, Directrice de thèse

M. Franck AMADIEU, Directeur de thèse

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier Franck Amadiou et Claudette Mariné d'avoir accepté d'encadrer mon travail, depuis la réalisation de mon Master jusqu'à la réalisation de cette thèse. Vos nombreux conseils, votre disponibilité sans faille et vos encouragements m'auront permis de finaliser ce travail. Vous m'avez permis de découvrir un monde qui m'était jusqu'alors inconnu, le monde de la recherche. Un énorme merci, donc, à vous deux, pour votre patience et votre bienveillance durant ces années.

Je remercie également les professeurs Mireille Bétrancourt, Jean-Michel Boucheix et Éric Jamet d'avoir accepté de participer à mon jury de soutenance de thèse et d'évaluer ce travail. Je remercie d'ailleurs doublement Mireille de m'avoir également accompagné dans la réalisation de ma première expérience.

Je remercie également tous les participants aux diverses expériences qui ont rendu ce travail possible.

Je n'oublie pas de remercier mon ami, Claude Tran, qui m'a suggéré cette idée. Sans toi, je n'aurais probablement jamais réalisé ce travail.

J'adresse également des remerciements à toute ma famille. Je vous remercie de m'avoir soutenu dans ce travail. Je remercie ma mère et mon père pour leur relecture attentive de ce travail.

Enfin, je terminerai en remerciant tout particulièrement mon épouse, Sylvie, et mes filles, Giulia et Mathilde. Merci Sylvie pour tes nombreuses relectures, et merci à toutes les trois d'avoir accepté ces trop longs moments de travail durant lesquels je n'étais pas présent. Vous avez permis à ce travail d'aboutir.

Résumé

Le Multitouch est le mode d'interaction homme-machine qui nous permet de contrôler nos smartphones et tablettes par la production de gestes. La cognition incarnée est un paradigme qui cherche à montrer que la cognition est basée sur des actions motrices, à caractère spatial, comme les gestes. Les habiletés visuo-spatiales sont un prédicteur de succès dans la compréhension des phénomènes dynamiques en sciences. Le but de ce travail est tout d'abord d'étudier les effets des gestes Multitouch, sur l'apprentissage, lors de l'étude de phénomènes dynamiques sur un simulateur, avec une tablette tactile. La recherche du lien entre les habiletés visuo-spatiales de l'apprenant et la production de gestes est également un objectif de ce travail. Trois expériences ont été menées visant à considérer le geste, soit comme une modalité d'encodage d'informations, soit comme un modulateur de l'attention. Deux de ces expériences portaient sur des tâches scolaires et la troisième portait sur une tâche simplement spatiale. La nature des gestes produits a été testée, ainsi que la nature de l'interaction (Multitouch, clavier, souris). L'effet de l'existence de cette interaction et son rôle selon le niveau d'habiletés visuo-spatiales des participants ont également été testés. Les expériences n'ont pas permis de mettre en évidence d'effet bénéfique du geste sur les résultats d'apprentissage. Cependant les résultats ont permis de montrer que le fait d'interagir avec le contenu pédagogique limitait le rôle joué par les habiletés visuo-spatiales dans les résultats observés. Ces résultats sont interprétés dans une approche visant à questionner le rôle joué par la nature des gestes produits et le type de connaissances à acquérir dans les modèles de la cognition incarnée et de la mémoire de travail.

Abstract

Multitouch is the mode of human-computer interaction that allows us to control our smartphones and tablets by producing gestures. Embodied cognition is a paradigm that seeks to prove that cognition is based on motor actions, with a spatial character, such as gestures. Spatial skills are a predictor of success in understanding dynamic phenomena in science. The aim of this work is first to study the effects of Multitouch gestures on learning when studying dynamic phenomena on a simulator with a touch-sensitive tablet. The research of the link between the learner's spatial skills and the production of gestures is also an objective of this work. Three experiments were conducted to consider gesture either as a modality for encoding information or as an attention modulator. Two of these experiments involved school

tasks and the third involved a purely spatial task. The nature of the gestures produced was tested, as well as the nature of the interaction (Multitouch, keyboard, mouse). The effect of the existence of this interaction and its role according to the level of spatial skills of the participants were also tested. The experiments did not reveal any beneficial effect of the gesture on learning outcomes. However, the results showed that interacting with the educational content limited the role played by spatial skills in the observed results. These results are interpreted in an approach aimed at questioning the role played by the nature of the gestures produced and the type of knowledge to be acquired in models of embodied cognition and working memory.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	1
PARTIE I - CADRE THEORIQUE	4
CHAPITRE 1 : L'APPRENTISSAGE AVEC DES TABLETTES TACTILES MULTITOUCH	4
1.1 BREF RAPPEL HISTORIQUE SUR LES TABLETTES TACTILES.....	4
1.2 QUELS EFFETS DES TABLETTES SUR L'APPRENTISSAGE (PERFORMANCE, MOTIVATION...) ?	5
1.3 ANALYSE ET CRITIQUE DES TRAVAUX ACTUELS SUR LES EFFETS DES TABLETTES SUR L'APPRENTISSAGE.....	10
1.3.1 <i>Nécessité d'identifier les propriétés des tablettes impactant l'apprentissage</i>	10
1.3.2 <i>Nécessité d'étudier isolément les caractéristiques des tablettes sur l'apprentissage : mobilité et interactions tactiles</i>	15
1.3.3 <i>Nécessité de prendre en compte la nature des tâches réalisées avec la tablette</i>	20
CHAPITRE 2 : GESTES ET COGNITION	24
2.1 INTRODUCTION.....	24
2.2 COGNITIVISME, CONNEXIONNISME ET ENACTION	25
2.3 LE PARADIGME DE LA COGNITION INCARNEE.....	27
2.3.1 <i>Origines</i>	27
2.3.2 <i>Cognition incarnée et cognition incarnée radicale</i>	30
2.4 LE GESTE DANS LES ACTIVITES COGNITIVES.....	36
2.4.1 <i>Gestes spontanés et gestes imposés</i>	36
2.4.2 <i>Le geste produit par l'apprenant</i>	37
2.4.3 <i>Le geste observé par l'apprenant</i>	38
2.4.4 <i>L'ajout d'une métaphore humaine</i>	39
2.5 NATURE DES GESTES PRODUITS EN FONCTION DU DOMAINE D'ETUDE.....	40
2.5.1 <i>Typologie des gestes produits</i>	40
2.5.2 <i>Le geste pour appréhender un concept lié à un mouvement</i>	43
2.5.3 <i>Le geste pour appréhender une connaissance abstraite</i>	44
2.6 MULTITOUCH, GESTES ET COGNITION INCARNEE : QUEL LIEN AVEC LA MEMOIRE DE TRAVAIL ?	46
2.6.1 <i>Les différents types de mémoire</i>	46
2.6.2 <i>Place du geste dans le modèle de Baddeley et Hitch</i>	47
2.6.3 <i>Mémoire de travail et attention</i>	49
2.6.4 <i>Fonctionnement de la mémoire de travail : goulet d'étranglement et focus attentionnel</i>	51
CHAPITRE 3 : LES HABILETES VISUO-SPATIALES DANS L'APPRENTISSAGE	56
3.1 DEFINITION DES HABILETES VISUO-SPATIALES.....	56
3.2 HABILETES VISUO-SPATIALES ET APPRENTISSAGE DE PHENOMENES DYNAMIQUES.....	57
3.3 LES HABILETES VISUO-SPATIALES COMME PREDICTEUR DE REUSSITE EN SCIENCES.....	58
PROBLÉMATIQUE : EFFET DU GESTE LORS D'UNE INTERACTION MULTITOUCH SUR LES PROCESSUS D'APPRENTISSAGE	60
PARTIE II – ÉTUDES EXPERIMENTALES	64
CHAPITRE 4 : EFFET DU GESTE MULTITOUCH DANS UNE TACHE SPATIALE	64
4.1 INTRODUCTION.....	64
4.2 NATURE DES HABILETES VISUO-SPATIALES MISES EN JEU DANS CETTE EXPERIENCE.....	65
4.2.1 <i>Développement des habiletés visuo-spatiales</i>	66
4.2.2 <i>Rotation mentale et rotation physique</i>	66
4.3 HYPOTHESES.....	68
4.4 METHODOLOGIE	68
4.4.1 <i>Participants</i>	68
4.4.2 <i>Matériel</i>	69
4.4.3 <i>Procédure</i>	76
4.5 HYPOTHESES OPERATIONNELLES	77
4.6 RESULTATS.....	78
4.6.1 <i>Performances à la tâche</i> :.....	78
4.6.2 <i>Durée de réalisation de la tâche</i> :.....	79

4.6.3	<i>Stratégies auto-rapportées :</i>	80
4.6.4	<i>Expérience utilisateur</i>	83
4.6.5	<i>Évolution des scores d'habiletés visuo-spatiales</i>	85
4.7	DISCUSSION	86
CHAPITRE 5 : EFFET DU GESTE SUR LA COMPREHENSION DE MOUVEMENTS DANS LE CHAMP DE PESANTEUR TERRESTRE		90
5.1	DIFFICULTES RENCONTREES PAR LES ETUDIANTS LORS DE L'ANALYSE DE MOUVEMENTS D'OBJETS DANS LE CHAMP DE PESANTEUR	91
5.1.1	<i>Les conceptions erronées en Mécanique :</i>	91
5.1.2	<i>Difficulté d'interprétation des représentations graphiques utilisées :</i>	93
5.2	L'UTILISATION DE SIMULATEURS NUMERIQUES OU DE JEUX VIDEO COMME AIDE A LA COMPREHENSION DES MOUVEMENTS D'OBJETS	95
5.3	LE FEEDBACK VISUEL LORS DE LA PRODUCTION DE GESTES SUR LA TABLETTE	96
5.4	HYPOTHESES	97
5.5	METHODOLOGIE	98
5.5.1	<i>Participants</i>	98
5.5.2	<i>Matériel</i>	98
5.5.3	<i>Procédure</i>	103
5.6	HYPOTHESES OPERATIONNELLES :	104
5.7	RESULTATS	105
5.7.1	<i>Évolution des scores entre pré-test et post-test</i>	105
5.7.2	<i>Prédiction qualitative des trajectoires</i>	106
5.7.3	<i>Compréhension des phénomènes sous-jacents</i>	107
5.7.4	<i>Stratégies auto-rapportées pour réaliser les activités pour le groupe vidéo :</i>	109
5.7.5	<i>Ressenti des utilisateurs sur l'utilisabilité de la tablette :</i>	109
5.7.6	<i>Ressenti sur l'efficacité de l'activité d'apprentissage</i>	110
5.8	DISCUSSION	111
CHAPITRE 6 : EFFET DU GESTE SUR L'ATTENTION LORS DE L'UTILISATION D'UN SIMULATEUR EN MECANIQUE		114
6.1	INTRODUCTION	114
6.2	ORIENTATION DE L'ATTENTION : LA NOTION DE GUIDAGE ATTENTIONNEL	115
6.3	LE MODELE APM : ANIMATION PROCESSING MODEL	116
6.4	LES DIFFERENTES FORMES D'ENERGIE EN MECANIQUE ET LEURS CONVERSIONS	118
6.4.1	<i>Description et analyse cognitive de la tâche</i>	118
6.4.2	<i>Introduction du geste dans la réalisation de la tâche</i>	121
6.5	HYPOTHESES	123
6.6	METHODOLOGIE	124
6.6.1	<i>Participants</i>	124
6.6.2	<i>Matériel</i>	124
6.6.3	<i>Procédure</i>	129
6.7	HYPOTHESES OPERATIONNELLES	129
6.8	RESULTATS	130
6.8.1	<i>Score aux tests post activités</i>	130
6.8.2	<i>Questions de mise en relation des différentes formes d'énergie</i>	131
6.8.3	<i>Questions liées aux phases 3 et 4 du modèle APM (top-down)</i>	132
6.8.4	<i>Questions de transfert</i>	133
6.8.5	<i>Questions de mémorisation</i>	134
6.8.6	<i>Temps sur les activités</i>	135
6.9	DISCUSSION	135
DISCUSSION GENERALE		138
7.1	RAPPEL DE OBJECTIFS	138
7.2	PRINCIPAUX RESULTATS	140
7.2.1	<i>Liens entre interaction Multitouch, résultats d'apprentissage et habiletés visuo-spatiales</i>	140
7.2.2	<i>Interaction Multitouch, nature du geste et processus cognitifs</i>	141
7.2.3	<i>Bilan des résultats</i>	142

7.3	LIMITES DES ETUDES.....	142
7.4	PERSPECTIVES.....	144
7.4.1	<i>Limites de la cognition incarnée pour les connaissances conceptuelles.....</i>	144
7.4.2	<i>Limites des modèles de mémoire pour l'apport des actions motrices.....</i>	146
7.4.3	<i>Implications de ce travail dans la classe.....</i>	148
BIBLIOGRAPHIE.....		150
ANNEXES.....		162
ANNEXE 1 : DOCUMENTS RELATIFS A L'EXPERIENCE 1.....		162
	<i>Test de rotation mentale.....</i>	162
	<i>Questionnaire sur la pratique auto-rapportée aux jeux vidéos.....</i>	168
	<i>Questionnaire sur la stratégie mise en œuvre dans la tâche.....</i>	168
	<i>Questionnaire sur l'aide ressentie en rapport avec la rotation de l'objet.....</i>	169
ANNEXE 2 : DOCUMENTS RELATIFS A L'EXPERIENCE 2.....		170
	<i>Questions du pré-test et post test (10 premières).....</i>	170
	<i>Fiche activité du groupe expérimental.....</i>	175
	<i>Stratégie préférentielle de visionnage de la vidéo.....</i>	179
	<i>Ressenti sur l'utilisabilité de la tablette.....</i>	179
	<i>Ressenti sur l'efficacité de l'activité d'apprentissage.....</i>	179
ANNEXE 3 : DOCUMENTS RELATIFS A L'EXPERIENCE 3.....		179
	<i>Activités de l'expérience 3 sur le simulateur.....</i>	179
	<i>Questionnaire post activités de l'expérience 3.....</i>	181
LISTE DES TABLEAUX		
TABLEAU 1 : CLASSEMENT DES HABILITES VISUO-SPATIALES SELON NEWCOMBE ET SHIPLEY (2015).....		57
TABLEAU 2 : FREQUENCE DES STRATEGIES UTILISEES APRES LE PREMIER VISIONNAGE DE LA VIDEO EN POURCENTAGES...		109
TABLEAU 3 : ANALYSE DE LA TACHE D'APPRENTISSAGE.....		120
TABLEAU 4 : MOYENNE ET ECART-TYPES DES SCORES GLOBAUX A L'ACTIVITE.....		130
LISTE DES FIGURES		
FIGURE 1 : MODELE DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL, TIRE DE BADDELEY (2000).....		48
FIGURE 2 : THEORIE COGNITIVE DE L'APPRENTISSAGE MULTIMEDIA, TIREE DE MAYER (2005).....		48
FIGURE 3 : REPRESENTATION DU MODELE DE COWAN (TIRE DE WORKING MEMORY CAPACITY, COWAN, 2005).....		52
FIGURE 4 : EVOLUTION DE LA TRACE MNESIQUE AU COURS DU TEMPS DANS LE MODELE TBRS TIRE DE PORTRAT, CAMOS ET BARROUILLET (2009).....		53
FIGURE 5 : EXEMPLE DE FIGURE UTILISEE DANS L'EXPERIENCE.....		65
FIGURE 6 : PREMIER ITEM DU TEST DE ROTATION MENTALE PROPOSE.....		69
FIGURE 7 : UN DES 36 CAS PROPOSE DANS LA PHASE D'ENTRAINEMENT.....		70
FIGURE 8 : FIGURE PRESENTANT UNE OCCLUSION.....		71
FIGURE 9 : SCENE PRESENTANT UN DISTRACTEUR DE TYPE MIROIR.....		72
FIGURE 10 : OBJET DE TYPE HOMOGENE.....		72
FIGURE 11 : PRESENTATION DES MODALITES D'INTERACTION SUR L'OBJET MOBILE (A GAUCHE CONDITION CLAVIER, AU MILIEU CONDITION SOURIS, A DROITE CONDITION MULTITOUCH).....		73
FIGURE 12 : PHASE D'ENTRAINEMENT POUR LA MODALITE D'INTERACTION MULTITOUCH.....		74
FIGURE 13: STRATEGIES UTILISEES DURANT LA TACHE.....		75
FIGURE 14 : RESENTI SUR L'AIDE APPOREE PAR L'INTERACTION.....		76
FIGURE 15 : SCORE OBTENU A LA TACHE (MAX = 36) SELON LE GROUPE.....		79
FIGURE 16 : DUREE MOYENNE DE REPONSE PAR SCENE.....		80
FIGURE 17 : STRATEGIE EVOQUEE DE TYPE ROTATION MENTALE.....		81
FIGURE 18 : DISPARITE ANGULAIRE MOYENNE SELON LA CONDITION D'INTERACTION.....		82
FIGURE 19 : NIVEAU DE ROTATION REELLE DE L'OBJET EVOQUE POUR LES GROUPES AVEC INTERACTION.....		83
FIGURE 20 : EFFET PERÇU DE LA ROTATION SUR LA FACILITE DE LA TACHE.....		84
FIGURE 21 : INFLUENCE PERÇUE DE LA ROTATION SUR LA RAPIDITE DE REPONSE.....		85
FIGURE 22 : SCORES AU PRE-TEST ET POST-TEST SUR LES HABILITES VISUO-SPATIALES.....		86
FIGURE 23 : CLASSEMENT DES ETUDIANTS EN FONCTION DES TYPES DE CONCEPTIONS ERRONEES CHEZ LES PARTICIPANTS.....		92
FIGURE 24 : EXEMPLE DE DIFFICULTE EN MECANIQUE (MCDERMOTT, ROSENQUIST, & ZEE 1987).....		93

FIGURE 25 : METHODE GRAPHIQUE POUR DETERMINER LA TRAJECTOIRE D'UN PROJECTILE. TIRE DE (MOORE, BAKER, FRANZEL, MCMAHON, & SONGER, 2010).....	94
FIGURE 26 : SIMULATEUR EQUATIONS OF MOTION : CHOIX DE LA SIMULATION.....	99
FIGURE 27 : SIMULATEUR DE CHUTE VERTICALE.....	100
FIGURE 28 : CALQUE POUR DESSINER LA TRAJECTOIRE A L'AIDE D'ADOBE DRAW.....	101
FIGURE 29 : EXEMPLE DE QUESTION DU PRE-TEST SUR LES CONNAISSANCES ANTERIEURES EN MECANIQUE.....	102
FIGURE 30 : ÉVOLUTION DE LA MOYENNE DES SCORES ENTRE LE PRE-TEST ET LE POST-TEST.....	105
FIGURE 31 : GAIN GLOBAL OBTENU SELON LA NATURE DE L'ACTIVITE ET LE NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES.....	106
FIGURE 32 : ÉVOLUTION DES SCORES ENTRE PRE-TEST ET POST-TEST SUR LES PREDICTIONS QUALITATIVES DE TRAJECTOIRES.....	106
FIGURE 33 : GAIN SUR LES PREDICTIONS QUALITATIVES DE TRAJECTOIRES SELON LA NATURE DE L'ACTIVITE ET LE NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES.....	107
FIGURE 34 : ÉVOLUTION DES SCORES ENTRE PRE-TEST ET POST-TEST SUR LA COMPREHENSION DES PHENOMENES.....	108
FIGURE 35 : GAIN SUR LES QUESTIONS DE COMPREHENSION DES CONCEPTS SELON LA NATURE DE L'ACTIVITE ET LE NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES.....	109
FIGURE 36 : UTILISABILITE PERÇUE DE LA TABLETTE POUR REALISER LES ACTIVITES SELON LA MODALITE ET LE NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES.....	110
FIGURE 37 : RESENTI SUR L'EFFICACITE DE L'ACTIVITE D'APPRENTISSAGE SELON LA MODALITE D'APPRENTISSAGE ET LES HABILETES VISUO-SPATIALES.....	111
FIGURE 38 : ANIMATION PROCESSING MODEL (TIRE DE LOWE ET BOUCHEIX, 2011).....	118
FIGURE 39 UN EXEMPLE D'ITEM DU TEST DE RAISONNEMENT MECANIQUE DU DAT5.....	124
FIGURE 40 : UN ITEM DU CARD ROTATION TEST (HÖFFLER & LEUTNER, 2011).....	125
FIGURE 41 : CAPTURE D'ECRAN DE LA VIDEO D'APPORT DE NOTIONS.....	126
FIGURE 42 : APERÇU DU SIMULATEUR EN FONCTIONNEMENT.....	126
FIGURE 43 : PREMIERE ACTIVITE SUR LE SIMULATEUR.....	128
FIGURE 44 : MOYENNE DES SCORES AU POST-TEST SELON LA MODALITE D'APPRENTISSAGE ET LES HABILETES VISUO-SPATIALES.....	131
FIGURE 45 : SCORE AUX QUESTIONS DE TYPE APM 1 ET 2 EN FONCTION DU NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES ET DU GROUPE.....	132
FIGURE 46 : SCORE AUX QUESTIONS DE TYPE APM 3 ET 4 EN FONCTION DU NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES ET DE LA MODALITE D'APPRENTISSAGE.....	133
FIGURE 47 : SCORE AUX QUESTIONS DE TRANSFERT EN FONCTION DE LA CONDITION D'APPRENTISSAGE ET DU NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES.....	134
FIGURE 48 : SCORE AUX QUESTIONS DE MEMORISATION SELON LE GROUPE ET LE SCORE AU TEST-CARDS (NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES).....	134
FIGURE 49 : DUREE DES ACTIVITES SUR LE SIMULATEUR EN SECONDES SELON LE GROUPE ET LE NIVEAU D'HABILETES VISUO-SPATIALES.....	135
FIGURE 50 : MODELE DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL TIRE DE SEPP ET AL. (2019).....	148

Introduction générale

« La tablette tactile, la connaissance au bout des doigts... ». Tel pourrait être le slogan d'un constructeur de tablette désirant vanter les bienfaits de son outil pour l'apprentissage à l'école. En effet, quoi de plus logique que de présenter les bienfaits d'un outil par ce qui le distingue des autres outils utilisés jusqu'alors, en l'occurrence, ici, l'interaction Multitouch. Mais quelles peuvent être les conséquences de ce type d'affirmation auprès des enseignants, auprès des décideurs politiques ? Et quelles peuvent en être les répercussions sur les élèves ?

Annoncé le 7 mai 2015, le plan numérique pour l'école se fixait pour objectif de faire rentrer l'école dans l'ère du numérique. Un des moyens déployés pour atteindre cet objectif et qui sera en partie le point de départ de ce travail est l'équipement des élèves en ordinateur ou tablettes tactiles. C'est ce dernier outil qui aura retenu notre attention. En effet, il présente une interface d'entrée différente des autres outils utilisés jusqu'alors dans les établissements, le Multitouch, une action directe avec des gestes directement sur l'écran. En tant qu'enseignant de physique-chimie, j'ai pu tester en classe ce type d'expérience de navigation dans des simulations de cette matière. L'expérience de navigation dans des environnements en trois dimensions est renouvelée et semble réellement facilitante pour appréhender les notions présentées. Mais pour autant, cette expérience utilisateur, renouvelée, est-elle le gage d'un meilleur apprentissage ? Assurant des fonctions d'accompagnement des usages du numérique à l'école, il me semblait important d'essayer de répondre à cette question afin d'éclairer au mieux l'ensemble des collègues sur les potentialités de cet outil. Le contexte d'étude de ce travail concernera l'apprentissage de notions de physique à l'aide d'un simulateur.

Dès lors, le cadre théorique qu'il semble naturel de convoquer est celui de la cognition incarnée. Mais derrière ce terme se cachent en fait plusieurs courants de recherche avec des visions opposées de la cognition. Les partisans de la cognition incarnée prônent une approche de la cognition exsangue de représentations (Chemero, 2011). D'autres chercheurs sont plus enclins à rechercher les effets des actions incarnées dans une perspective de cognition basée sur l'existence de représentations (Clark, 2010). C'est cette dernière approche qui aura guidé notre travail et dès lors un des objectifs de ce dernier sera d'essayer de déterminer les processus cognitifs mis en jeu lors de la production de gestes. Nous avons pour cela convoqué deux approches différentes du fonctionnement de la mémoire de travail. La première est l'approche de Baddeley et Hitch (1974) dans laquelle nous considérerons le geste comme

participant à l'encodage d'informations, en complément des modalités visuelles et auditives. La deuxième, est l'approche de Barrouillet, Bernardin et Camos (2004) dans laquelle nous considérerons le geste produit comme un modulateur de l'attention de l'apprenant. Enfin, un des intérêts de ce travail sera de rechercher les bénéfices d'une action incarnée pour l'acquisition de connaissances conceptuelles. En effet, les résultats probants dans ce domaine le sont souvent dans le cas d'apprentissage procéduraux (Bara & Tricot, 2017).

L'apport du geste dans l'apprentissage a été souvent étudié comme complément au langage dans des activités d'apprentissage (Goldin-Meadow, 2014). Ce travail a permis d'établir une typologie des gestes que nous reprendrons ici. Dans le cadre de la production de gestes dans des environnements numériques, les études recherchant les bénéfices des gestes produits sur l'apprentissage ont été souvent réalisés à partir de dispositifs permettant la production de gestes de grande amplitude et difficilement utilisables en classe (Sheu & Chen, 2014). L'apport de ce travail sera de rechercher les bénéfices pour l'apprentissage d'un geste limité, réalisé avec du matériel disponible en classe.

Enfin, les habiletés visuo-spatiales sont reconnues comme un facteur de réussite en sciences (Wai, Lubinski, & Benbow, 2009). Un des bénéfices de la production de gestes serait de spatialiser des idées qui ne le sont pas (Goldin-Meadow, 2014). Enfin, les habiletés visuo-spatiales jouent un rôle dans l'apprentissage de phénomènes dynamiques. Les animations peuvent être utiles pour les participants ayant de faibles habiletés visuo-spatiales (Höffler & Leutner, 2011). Ce travail devra donc permettre de rechercher un effet bénéfique du geste, lors de l'utilisation de simulations, pour des personnes disposant de faibles habiletés visuo-spatiales.

La partie théorique de ce travail se décomposera donc en trois sous parties. Dans la première partie (Chapitre 1 : L'apprentissage avec des tablettes Multitouch) nous établirons un état des lieux des recherches menées sur les tablettes tactiles en éducation. Cet état des lieux aura pour objectif de relever les difficultés qui peuvent être rencontrées, dans la recherche de bénéfices d'un outil sur l'apprentissage et d'explicitier les choix que nous avons fait dans ce travail. La deuxième partie (Chapitre 2 : Gestes et cognition) permettra de rappeler le concept de cognition incarnée, de préciser une typologie concernant le rôle des gestes produits et enfin de faire un état des lieux, sur les résultats de recherches liés à la production de gestes sur une interface Multitouch. La troisième partie (Chapitre 3 : Les habiletés visuo-spatiales dans l'apprentissage) dressera un état des lieux des connaissances sur

le rôle des habiletés visuo-spatiales dans l'apprentissage des sciences, notamment dans le cadre de l'étude de phénomènes dynamiques.

Enfin, la partie empirique de ce travail se décomposera en trois expériences. La première (chapitre 4 : effet du geste Multitouch dans une tâche spatiale) recherchera un effet de l'interaction Multitouch (nature du geste produit et proximité de ce dernier) dans une tâche de rotation spatiale. Cette première étude sera l'occasion de rechercher un lien entre les habiletés visuo-spatiales du participant et la réalisation d'une tâche spatiale impliquant une action motrice, sans la difficulté d'apprentissage d'un concept en physique.

La deuxième expérience (chapitre 5 : effets du geste sur la compréhension de mouvements dans le champ de pesanteur terrestre) introduira le geste, dans l'apprentissage d'un concept dynamique en physique. Cette expérience, sera l'occasion de rechercher les bénéfices de la production de différents types de gestes (iconiques et métaphoriques), en fonction de la nature de la connaissance à acquérir. Dans cette expérience, le geste sera considéré comme une source supplémentaire d'encodage d'informations.

La dernière expérience (chapitre 6 : Effet du geste sur l'attention lors de l'utilisation d'un simulateur en mécanique) sera l'occasion de rechercher, cette fois, un effet du geste sur l'attention de l'apprenant. Des gestes de suivi de mouvements seront introduits dans cette expérience afin de répondre à cette question.

La discussion générale qui conclura ce travail dégagera les principaux enseignements de cette recherche et leurs conséquences, pour les pratiques pédagogiques, dans le contexte de la classe.

Partie I - Cadre Théorique

Chapitre 1 : L'apprentissage avec des tablettes tactiles Multitouch

Dans cette partie, nous allons faire un bref rappel historique sur l'évolution des tablettes tactiles et leur adoption dans le domaine éducatif. Cette partie introductive sera également l'occasion de faire un état des lieux des études menées suite à ces introductions. A partir de cet état des lieux, nous expliquerons l'orientation choisie dans ce travail pour étudier l'impact des tablettes tactiles dans des situations d'apprentissage.

1.1 Bref rappel historique sur les tablettes tactiles.

La tablette tactile est un objet technologique relativement récent. Même si l'on peut retrouver des modèles d'outils tactiles vers la fin des années 1980, ce n'est qu'en 2007 avec le lancement de l'iPhone et en avril-mai 2010 avec la commercialisation d'une tablette dotée d'un écran 10 pouces, l'iPad, par la société Apple, que ce type d'appareil a rencontré un succès commercial auprès du grand public. Il est probable que la démocratisation en parallèle de l'accès au haut débit mobile (3G/4G) ait favorisé cette démocratisation. Cependant, l'évolution la plus marquante avec ces appareils reste l'apparition d'un écran tactile multipoint comme interface utilisateur. Les doigts deviennent alors l'interface d'entrée privilégiée entre l'homme et la machine et il est dès lors possible d'interagir avec son outil numérique et de le piloter sans clavier ou souris.

L'iPad présentait cependant quelques défauts de jeunesse pouvant rendre son adoption dans le domaine de l'éducation rédhibitoire : absence d'appareil photo, pas de possibilité de projection vidéo sans fil. Ces quelques défauts furent rapidement corrigés avec la sortie de l'iPad 2 en mars 2011. En juin 2011 c'est au tour de la société Samsung de présenter son modèle de tablette tactile, la GalaxyTab 10.1 doté d'un écran de 10 pouces et fonctionnant avec un système d'exploitation Android. Cette tablette tactile présentait des fonctionnalités similaires à celles de l'iPad. Dès lors, un engouement fort pour ces outils est apparu pour leur utilisation en classe et de nombreuses expérimentations ont vu le jour dès 2011 dans plusieurs pays. En parallèle, les premiers travaux de recherche utilisant ces dispositifs ont commencé à être publiés.

Il faut noter que ces deux types de tablettes utilisent un système d'exploitation spécifique aux tablettes tactiles rendant incompatibles avec ces dernières des logiciels développés pour des systèmes d'exploitation comme Linux ou Mac OSX. La stratégie du

troisième grand acteur économique du marché des tablettes tactiles, Microsoft, est différente. Depuis 2015 les tablettes Surface de ce constructeur utilisent le même système d'exploitation Windows que les ordinateurs de bureau, avec une interface utilisateur adaptée aux tablettes tactiles, ce qui les rend compatible avec tous les logiciels développés sous Windows. Cette stratégie, a permis notamment l'essor d'un autre type d'appareil, le PC hybride, ordinateur portable avec un clavier présentant une interface tactile. Cette dernière, n'est donc plus l'apanage des tablettes. Mais, en parallèle, des périphériques claviers détachables ont également été développés pour les tablettes (iPad Pro par exemple).

En quelques années, bien que les fonctionnalités de base des tablettes n'aient pas ou très peu évolué, ces outils ont gagné en puissance, qualité d'affichage et fluidité de l'interface. De plus, de nombreuses applications dédiées à ces supports ont été développées et leur intégration dans des environnements initialement prévus pour accueillir des ordinateurs fixes, facilitée (déploiement d'infrastructures dans les lycées par exemple). Dès lors, l'essor des tablettes et leur attrait font que ces outils sont de plus en plus déployés dans les classes à des fins d'apprentissage, soit comme outil de complément aux salles informatiques (mallettes de « classe mobile » par exemple), soit comme outil individuel distribué aux élèves.

Dans la partie suivante, nous allons faire un état des lieux des études portant sur l'évaluation de l'intégration de ces dispositifs en classe. Nous verrons, notamment, l'évolution des objectifs d'étude concernant l'utilisation des tablettes tactiles en classe depuis leur adoption et les effets des tablettes sur l'apprentissage, en incluant les performances et les motivations des apprenants.

1.2 Quels effets des tablettes sur l'apprentissage (performance, motivation...) ?

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à trois revues de littérature, concernant l'utilisation des tablettes tactiles en éducation. La première fut réalisée par Dhir, Gahwaji et Nyman (2013) aux débuts de l'utilisation de l'iPad en classe. Cette étude a permis de mettre en évidence, des perspectives ainsi que des freins possibles concernant l'utilisation de tablettes. Nous les développerons par la suite. Une seconde revue de littérature fut réalisée par Haßler, Major et Hennessy (2016), après quelques années de recul sur l'utilisation des tablettes tactiles en classe. Les auteurs ont cherché à analyser si l'introduction de la tablette avait produit des effets positifs sur l'apprentissage. Enfin, la dernière étude sur laquelle nous nous appuyons a été réalisée par Mulet, van de Leemput et Amadiou (2019). Cette dernière se focalise sur les perceptions des tablettes tactiles par les utilisateurs.

Dans un article soumis en janvier 2012, soit à peine plus d'un an après la commercialisation du premier iPad, Dhir, Gahwaji et Nyman (2013) se sont intéressés à l'impact de l'iPad en éducation en analysant les diverses études publiées alors. Une recherche sur les mots-clés iPad et éducation dans 4 bases de données leur ont permis, après nettoyage des résultats, d'extraire 72 articles leur permettant d'analyser les possibles avantages et les difficultés rencontrées lors de l'introduction de l'iPad dans un contexte éducatif. Malgré le peu de recul sur l'utilisation en classe de ces dispositifs, les auteurs ont pu relever certains aspects encourageants concernant l'utilisation des tablettes en classe tant du point de vue de l'élève que de la pratique enseignante. Certains points sont liés spécifiquement à la technologie utilisée et donc intrinsèques aux tablettes comme :

- Une interface tactile de haut niveau, permettant une expérience utilisateur¹ de qualité, facile même pour des utilisateurs non familiers avec le numérique, lors d'activités de lecture et d'écriture. Ce dernier point peut paraître surprenant car l'écriture sans clavier est souvent considérée comme plus difficile lors de l'utilisation de tablettes. Nous y reviendrons plus loin.
- Une autonomie importante et un outil immédiatement utilisable grâce à son dispositif de mise en veille performant, qui évite d'éteindre complètement une tablette.
- Un outil mobile qui peut être utilisé quand on veut et où on le veut par les enseignants et les élèves. Un enseignant peut se déplacer, par exemple, dans la classe et projeter le contenu de sa tablette ou de celle d'un élève.

Ces spécificités techniques de la tablette, ainsi que les moyens de communication qu'elle intègre, en ferait de plus, un outil, favorisant la communication entre élèves, favorisant aussi le travail collaboratif.

Parmi les freins évoqués, peu semblent liés à la nature même de la tablette. Certains restent technologiques comme par exemple le manque de couverture Wifi des établissements. Mais, pour leur grande majorité, les freins évoqués semblent identiques à ceux rencontrés lors de l'introduction de tout nouvel outil technologique dans le milieu éducatif : l'absence de maîtrise des enseignants vis-à-vis de l'outil informatique, le manque de temps de ces derniers pour s'approprier cet outil et l'intégrer efficacement dans leur pédagogie, des programmes trop rigides, le manque de soutien de l'administration lors de la mise en œuvre de projets

¹ L'expérience utilisateur désigne l'expérience vécue par un utilisateur lors de l'interaction avec un service ou un objet. Ce concept mis en avant par Donald Norman dans les années 90 étend les concepts d'ergonomie comme l'utilisabilité en tenant compte notamment de l'aspect émotionnel de l'interaction.

numériques dans l'établissement... Pour la tablette tactile, comme pour les technologies antérieures (ordinateur, tableau interactif), des attitudes contrastées d'adoption forte, ou de rejet, ont donc été observées chez les enseignants. Au final, cette analyse se centre plus, sur des potentialités espérées, liées à l'introduction de la tablette tactile en classe, que sur de réelles évaluations objectives des usages et de leur impact sur l'apprentissage. Les bénéfices sur l'apprentissage, sûrement à cause du peu de recul sur l'utilisation de cet outil, à l'époque de l'écriture de l'article, sont en effet absents. On les retrouve cependant, au cœur d'une deuxième analyse, publiée après quelques années d'utilisation de la tablette tactile en classe.

Cette deuxième revue de littérature concernant l'utilisation de tablettes tactiles dans le contexte éducatif, a été réalisée par Haßler et al., (2016). Ces auteurs, ont analysé différentes études portant sur l'utilisation de tablettes tactiles en classe, auprès d'élèves du primaire et du secondaire. Ils ont focalisé leur travail sur la recherche de bénéfices d'apprentissage liés à l'utilisation des tablettes tactiles. Une première recherche, dans plusieurs bases de données, a permis d'extraire 103 articles traitant de l'usage des tablettes, soit légèrement plus que dans l'étude précédente. Des critères méthodologiques leur ont permis de ne retenir que 23 études jugées aux yeux de ces auteurs, comme satisfaisantes. Parmi ces 23 études, 12 se distinguaient par leur rigueur méthodologique évaluée par plusieurs relecteurs. Ces études étaient variées en termes de matériels utilisés, de modalité de distribution de l'appareil (un pour un ou classe mobile), ainsi qu'en termes de tailles d'échantillons et de pays. Enfin, diverses matières et activités d'apprentissage étaient mises en œuvre.

Sur ces 23 études, 16 études présentaient des bénéfices d'apprentissage liés à l'utilisation de la tablette. En revanche, pour 2 études, l'utilisation de la tablette tactile avait été défavorable à l'apprentissage. Pour les 5 études restantes, l'utilisation de la tablette tactile ne présentait ni avantage, ni désavantage. Il est intéressant de noter, que dans les études ne présentant pas de bénéfice d'utilisation de la tablette, l'absence de plus-value n'était dans l'ensemble, pas directement attribuée à la tablette mais plutôt à une utilisation ne tirant pas parti des potentialités de cet outil en classe ; la pédagogie ne semblait pas avoir été repensée pour tenir compte des contraintes de mise en œuvre de l'outil. Seule une étude semblait mettre en évidence des problèmes techniques liés aux applications utilisées. Les élèves jugeaient d'ailleurs positivement la tablette et semblaient enclins à l'utiliser. On trouve donc, ici, les prémices d'une acceptabilité forte de cet outil qui malheureusement n'est pas toujours synonyme de meilleurs résultats d'apprentissage. Enfin, il ne semble pas y avoir un effet de la matière étudiée sur les résultats liés à l'utilisation de la tablette tactile.

Pour les études dans lesquelles l'utilisation de la tablette conduit à des bénéfices d'apprentissage, les facteurs de succès sont cette fois souvent, attribués à l'outil et à ses caractéristiques. Pour les auteurs, la tablette présenterait une affordance à soutenir l'apprentissage et ils mettent en avant, des bénéfices pour beaucoup, similaires à ceux de la précédente analyse : utilisabilité forte avec l'intégration de nombreux outils, mobilité de l'outil, facilité de personnalisation de ce dernier et aspect tactile de l'écran permettant de combiner modalités visuelles, tactiles ou kinesthésiques. Elle semblerait cependant, moins bien adaptée à l'écriture, à cause du clavier virtuel.

Dans cette analyse, comme dans la précédente, la tablette semble favoriser des modalités pédagogiques de collaboration et d'interaction. De plus, elle aurait induit chez l'enseignant la mise en œuvre de nouvelles modalités pédagogiques. Mais, des aspects techniques pouvant nuire à l'apprentissage sont également cités, comme par exemple, l'absence sur la tablette de technologies souvent utilisées pour la visualisation d'animations : Flash et Java. Enfin, l'aspect distracteur de la tablette est mis en avant comme étant potentiellement néfaste à l'apprentissage. Il en est de même pour la mise à disposition, sur la tablette, de ressources présentant un niveau d'interaction trop élevé pour les apprenants : par exemple, construire un document intégrant texte et images en manipulant ces dernières dans l'interface.

Ainsi, l'un des principaux arguments évoqués par les auteurs pour expliquer l'aspect positif de l'utilisation des tablettes, sur les résultats d'apprentissage, est leur forte affordance à soutenir cet apprentissage. Il est difficile de savoir si le terme affordance évoque ici le concept développé par Gibson (1979) dans son approche écologique de la perception. Si tel était le cas, dire que la tablette présente des affordances pour l'apprentissage, semble un peu maladroit. En effet, dans une approche écologique, l'affordance de l'outil ne peut être dissociée de l'individu ni du contexte environnemental dans lequel il est mis en œuvre, comme nous le verrons, dans la partie de ce travail consacrée à la cognition incarnée. Prenons par exemple, simplement un aspect comme la personnalisation de la tablette qui est évoqué dans cet article. Il peut être vu comme un avantage par les élèves, quand la tablette est individuelle alors que pour les mêmes élèves, il peut devenir un désavantage et source de problèmes techniques quand la tablette est partagée entre plusieurs élèves, comme dans le cas d'une classe mobile. Il semble donc difficile, d'évoquer les bénéfices liés aux caractéristiques de l'outil, indépendamment du contexte d'utilisation de ce dernier.

Mais il est aussi possible, que les bénéfices obtenus dans les situations d'apprentissage, soient simplement liés à un engagement supérieur des élèves dans les tâches d'apprentissage plutôt qu'aux caractéristiques techniques intrinsèques de la tablette. Ce sur-engagement, pourrait être lié à une représentation très positive qu'auraient les élèves de l'outil tablette tactile, représentation pouvant avoir des déterminants personnels ou sociaux. Nous sommes ici alors plutôt proche du concept d'acceptabilité des technologies. Comme le précisent Mulet et al. (2019, p.5, notre traduction) :

« Les modèles d'acceptabilité offrent un cadre théorique solide pour obtenir une image de la façon dont les utilisateurs perçoivent l'utilisation des tablettes pour apprendre. Ces perceptions déterminent l'intention et l'utilisation comportementale des tablettes, mais peuvent également prédire d'autres facteurs critiques pour l'apprentissage. Ils peuvent influencer l'implication des élèves dans les tâches d'apprentissage, la valeur qu'ils accordent aux tâches d'apprentissage avec des tablettes, et plus largement leurs motivations. »

Ces auteurs se sont donc intéressés à la perception des étudiants vis-à-vis des tablettes dans un contexte d'apprentissage. Leur recherche initiale à partir des mots clés ((étudiant) OU (apprenant)) ET ((acceptation) OU (attitude) OU (adoption) OU (perception)) ET ((tablette) OU (iPad))) a retourné une liste de 1030 articles soit environ 10 fois plus que dans les précédentes études. La tablette tactile semble donc intéresser de plus en plus le monde de la recherche. Une analyse plus poussée, des contenus des articles, a permis à ces auteurs de sélectionner 41 articles et de faire un état des lieux concernant les représentations des étudiants du primaire et du secondaire, vis-à-vis de la tablette tactile dans l'apprentissage. A ce stade, deux points sont importants à noter :

- Seulement 4 études se concentraient sur des tâches spécifiques d'apprentissage.
- L'évolution des représentations des élèves au cours du temps semble avoir été très peu évaluée.

Les résultats de cette analyse montrent que, dans l'ensemble, les élèves ont une représentation positive vis-à-vis de la tablette pour apprendre. Cela est d'autant plus vrai que l'apprenant est jeune. La tablette est globalement vue comme facile à utiliser. Néanmoins, la prise en compte des types de tâches et situations amène à une modération sur les perceptions positives des tablettes par les élèves. En effet, si la tablette tactile est perçue par les élèves comme bien adaptée pour la réalisation de tâches de visualisation, de recherche dans les documents ou de production multimédia (création audio et vidéo), elle serait en revanche,

moins bien adaptée à l'écriture, en raison des difficultés entraînées par le clavier virtuel. Également, les tablettes peuvent être source de pénibilités physiques auto-rapportées par les élèves en cas d'utilisation prolongée (migraines, fatigue oculaire) en raison du rétroéclairage de l'écran.

Nous venons de voir différentes façons d'aborder les recherches concernant l'utilisation de tablettes tactiles dans l'éducation. La première analyse a permis, de déterminer les éventuelles potentialités de la tablette en éducation, à sa sortie. Dans la seconde analyse, les recherches se sont centrées sur des bénéfices en termes de résultats d'apprentissage. Enfin, dans la troisième analyse, ce sont les perceptions qu'avaient les élèves sur l'utilisation de la tablette tactile en classe, qui ont été questionnées. Nous avons, ici, dégagé les principaux résultats de ces études mais la situation semble bien plus contrastée. Comme le soulignent les auteurs des trois analyses, certaines études amènent parfois à des résultats contradictoires et ces derniers sont donc à nuancer. Quelles peuvent être les causes de ces résultats contrastés ? Nous pouvons émettre deux hypothèses liées à :

- L'approche d'étude utilisée : analyser l'outil tablette tactile de manière trop générale sans tenir compte de la nature des tâches proposées, ou bien, en ne mettant pas en place des situations expérimentales permettant la comparaison avec le même type de tâches sur d'autres support.
- L'interprétation des résultats obtenus : cette dernière peut être rendu difficile quand de fortes disparités interindividuelles ou intergroupes sont présentes.

Il nous semble que le traitement réservé à l'écriture dans ces études et dans les trois revues de littérature est un bon exemple pour illustrer ces difficultés. Bien que cela ne soit pas l'objet de ce travail, qui nous le rappelons, porte sur l'effet des gestes sur tablette dans des tâches scolaires, nous utiliserons donc cet exemple de l'écriture, dans la partie suivante, en essayant de bien mettre en évidence ces difficultés, afin de proposer, in fine, un axe d'étude concernant l'utilisation des tablettes tactiles en classe, avec des élèves du secondaire, qui limiterait les conséquences de ces effets.

1.3 Analyse et critique des travaux actuels sur les effets des tablettes sur l'apprentissage

1.3.1 Nécessité d'identifier les propriétés des tablettes impactant l'apprentissage

1.3.1.1 Questions sur le protocole mis en œuvre

Des analyses précédentes, il semble ressortir que les études ont, dans leur majorité, tenté d'étudier l'impact des tablettes en considérant ces dernières de manière globale. Que ce soit, à

travers le prisme des résultats d'apprentissage ou à travers celui de la perception des utilisateurs, peu d'études semblent avoir spécifiquement mis en œuvre des protocoles précis, permettant de relier les résultats obtenus en termes de performances à une caractéristique intrinsèque à la tablette tactile. Cela nous amène à nous poser plusieurs questions concernant les résultats évoqués :

- L'adaptabilité supposée de la tablette à ces diverses tâches est-elle réellement liée à un aspect technologique de l'outil utilisé ?
- Si oui, cet aspect technologique est-il spécifique aux tablettes ? En d'autres termes, peut-on observer des effets similaires sur d'autres dispositifs numériques (ex. ordinateur) ?
- Les tâches mobilisées dans les études, sont-elles suffisamment spécifiées et spécifiques, pour conclure sur les effets des propriétés des tablettes sur l'apprentissage ?

Pour les deux premières questions, il semble bien que la majorité des points évoqués puisse être liés à des points technologiques spécifiques aux tablettes tactiles (si on les compare à un ordinateur fixe, voir même un ordinateur portable). Par exemple, la forte intégration des outils de captation audio et vidéos sur la tablette et la facilité d'accès à des applications de montage, avec une interface simplifiée, pourrait expliquer la facilité perçue pour la réalisation de tâches multimédias (Haßler et al., 2016). Mais, peut-on le vérifier sans réaliser la même tâche avec des outils numériques plus classiques (caméra et ordinateur par exemple) et avec un public similaire ?

On peut, dans le même ordre d'idée, supposer que la propriété tactile des interfaces soit responsable de la facilité d'utilisation perçue chez les apprenants pour les tâches de recherche ou de navigation, mais la validité de cette affirmation reste à démontrer.

La situation semble plus claire concernant les aspects négatifs de la tablette, pour lesquels, les responsables techniques semblent bien identifiés et les affirmations les concernant récurrentes :

- L'écran rétroéclairé semble être responsable en cas d'utilisation prolongée de la tablette en classe de problèmes physiques (maux de tête, fatigue oculaire, ...).
- Le clavier virtuel serait lui inadapté à la réalisation de tâches d'écriture.

Même s'il semble exister un lien entre l'utilisation des écrans rétroéclairés et des problèmes oculaires (Nakaishi & Yamada, 1999), il est important de remarquer que cet

équipement n'est pas spécifique aux tablettes tactiles et équipe également les écrans d'ordinateurs. Ce point n'est donc pas spécifique aux tablettes tactiles et n'a donc de sens que si l'on oppose une activité pédagogique sur écran (tablette tactile ou ordinateur) avec une activité débranchée plus classique. De plus, il serait intéressant de mesurer pour un élève le ratio entre la durée derrière un écran rétroéclairé liée à une activité pédagogique et entre la durée derrière un écran rétroéclairé liée à une activité non pédagogique. Il est possible que nous soyons en présence d'une sorte d'« effet cocktail » mais si tel était le cas il serait surprenant que ces maux physiques n'apparaissent que lors de la réalisation de tâches pédagogiques.

Le clavier virtuel serait lui un handicap pour la réalisation de tâches d'écriture. Ce point semble ressortir de différentes études (Mulet et al., 2019). L'impact du clavier intégré a pu être testé par Ling (2016). Dans cette étude, des élèves ont passé des tests de lecture et de mathématiques mais aussi d'écriture en utilisant trois outils différents : un ordinateur de bureau, un iPad seul et un iPad avec clavier auxiliaire. Les élèves avaient une pratique d'utilisation de l'outil de six mois au moins. Il ressort de cette étude que la surface occupée par le clavier intégré sur l'écran et la difficulté de réaliser des chiffres sur un iPad avec un clavier intégré sont handicapantes pour des tâches d'écriture. Sans forcément remettre en cause cette conclusion, il nous semble important de regarder plus en détails, dans la prochaine partie, les résultats qui ont conduit à l'établir.

1.3.1.2 Questions sur l'interprétation des résultats obtenus

Commençons par relever deux points positifs très importants de l'étude de Ling (2016) que nous venons de décrire dans les lignes précédentes :

- L'échantillon testé était conséquent : 403 élèves d'âge voisin de 14 ans et ayant plus de six mois d'utilisation de la tablette iPad en classe.
- Les auteurs ont pris soin de comparer la même tâche réalisée avec une tablette et son clavier visuel avec la même tâche réalisée soit avec une tablette et clavier déporté, soit un ordinateur avec clavier et souris ou plus classiquement sur papier.

Les résultats concernant les tests mettant en jeu des tâches d'écriture révèlent deux aspects très intéressants. D'une part, les perceptions des utilisateurs concernant la difficulté d'écrire avec l'iPad ne sont pas suivies de moins bons résultats aux tests. Il n'y a pas de désavantage concernant les résultats aux tests à écrire avec un outil numérique et quelle que soit la nature de ce dernier, pour la tâche étudiée. D'autre part, les perceptions des utilisateurs

ne sont pas si tranchées que les conclusions des différentes analyses précédentes le laissent entendre. En effet, les méthodes préférées des utilisateurs pour écrire sont équitablement réparties entre les différentes modalités (33% pour le papier, 35% pour l'ordinateur et 32% pour l'iPad).

Intéressons-nous en premier lieu à ce dernier point. Parmi les utilisateurs disant préférer l'écriture avec l'iPad, deux tiers disent préférer écrire avec un clavier externe. Parmi ceux préférant écrire avec un clavier intégré, le clavier externe est rejeté car il nécessite de jongler entre le clavier et l'écran pour le pointage, soit entre deux dispositifs. Y aurait-il un problème dans cette rupture de la coordination œil-main entre le dispositif de pointage et d'écriture pour certains utilisateurs ? Ce problème peut-il dépendre du niveau d'habiletés visuo-spatiales de ces derniers ? Quel peut être le rôle de l'environnement des utilisateurs (scolaire ou familial) sur ces ressentis ? Toutes ces questions restent à trancher.

Un deuxième point très intéressant de cette étude est que les élèves provenaient de 4 écoles différentes (A, B, C et D). Au-delà de l'analyse statistique globale, présentant des résultats très équilibrés entre les trois modalités d'écriture, on constate de fortes disparités entre les établissements de provenance des élèves. Les élèves de l'école B disent préférer l'écriture sur papier à 50% contre 14% pour l'iPad alors que la modalité papier n'est préférée qu'à 20 et 21% pour les élèves des écoles C et D. Pour ces écoles, plébiscitant l'écriture numérique, les résultats sont pour l'ordinateur et l'iPad respectivement de 50% et 30% pour l'école C et de 39% et 40% pour l'école D. Pour cette dernière école, les élèves à près de 60% préfèrent utiliser le clavier virtuel. Il y a donc bien des établissements où l'écriture numérique est préférée à l'écriture papier pour la tâche proposée. De plus, dans un de ces établissements la modalité jugée comme la moins favorable en général, à savoir l'écriture sur tablette avec clavier virtuel est la modalité préférée.

Quels facteurs permettent d'expliquer que les élèves des écoles C et D préfèrent écrire sur un iPad ou un ordinateur alors que ceux de l'école B préfèrent majoritairement écrire sur du papier ? Il est peu probable que la cause de ces ressentis soit seulement technologique. Les résultats des tests passés montrent que cet effet est surtout subjectif, mais quelles peuvent en être les causes ?

Ces fortes différences intergroupes concernant le ressenti de la tablette vis-à-vis de l'écriture peuvent-elles être induites par l'environnement technologique des étudiants ? Il semble en effet que lors des tests il y ait eu peu de problèmes techniques dans les écoles C et D. Si cela était le cas régulièrement dans les diverses écoles, il est probable que les

enseignants et étudiants utilisent moins la tablette tactile pour écrire. Et donc, en conséquence, les étudiants de ces écoles ont moins acquis des automatismes avec ces outils. La pré-étude semble d'ailleurs confirmer, chez les élèves de l'école B, une utilisation moindre des outils numériques pour écrire.

Le rôle de l'environnement social des apprenants peut également se révéler important pour expliquer cette différence de point de vue. Par exemple, Montrieux, Courtois, Raes, Schellens et De Marez, (2014) ont montré que les apprenants sont influencés dans leur acceptabilité des tablettes par les normes subjectives liées aux ressentis de leurs pairs ou de leurs parents. Les différentes écoles se distinguent par des origines ethniques majoritaires, des étudiants, différentes. Même si l'origine ethnique a été testée ici de manière transversale et n'a pas montré d'impact sur le ressenti des élèves, l'environnement socio-économique des élèves n'a cependant pas ici été questionné.

Enfin, ce ressenti différent vis-à-vis de l'écriture sur iPad entre les différentes écoles peut-il être lié au ressenti des enseignants vis-à-vis de l'écriture numérique dans ces écoles ? Cela n'a pas été testé, et pourtant, là encore, des disparités existent entre les enseignants sur le ressenti qu'ils ont de la tablette et sur la manière de l'utiliser en classe. (Montrieux et al., 2014).

Pour terminer, la façon d'utiliser la tablette en classe a également une répercussion sur le ressenti des utilisateurs sur cette dernière. Dans leur étude comparant trois modalités pédagogiques d'utilisation de la tablette tactile en classe, Montrieux, Raes et Schellens (2017) ont montré que les modalités mettant en jeu une activité de l'enseignant permettaient d'obtenir de meilleurs résultats qu'une modalité présentant une approche trop socioconstructiviste de l'enseignement. De plus, les modalités avec intervention de l'enseignant semblent plus appréciées des élèves.

Au vu de tous ces questionnements que nous venons de faire, il nous semble difficile de conclure que la tablette tactile est inadaptée à l'écriture. De fortes différences intergroupes dans cette étude de Ling (2016) laissent à penser que l'aspect technologique n'est pas ici la cause majeure du ressenti sur l'inadéquation de l'iPad à l'écriture et d'autres études nous semblent nécessaires, avant de préconiser qu'il ne faut pas écrire avec une tablette tactile dans les établissements scolaires.

Mais encore faudrait-il se mettre d'accord sur ce que veut-dire écrire avec une tablette ? Rédiger une thèse et prendre des notes en cours sont par exemples, deux activités d'écriture mais elles sont de nature différente, ne serait-ce, que par la dimension temporelle

prégnante dans la deuxième activité. De même, faire une rédaction en français est une activité d'écriture bien différente que de réaliser un devoir surveillé de mathématiques sur une tablette, à cause de la difficulté d'écrire des formules mathématiques (sur tout support informatique d'ailleurs). Il nous semble donc indispensable de bien clarifier la tâche d'apprentissage avant d'essayer d'évoquer l'impact d'une technologie en classe. Nous consacrerons donc un prochain chapitre à détailler ce point crucial à toute étude sur l'impact d'une technologie en éducation.

Avantage financier ou simple effet de mode, les tablettes sont malgré tout de plus en plus déployées dans les établissements scolaires. Bien sûr, la justification d'un tel déploiement sera toujours pédagogique. Il est donc légitime de se poser la question de l'intégration de tels outils dans les écoles. Nous venons de voir dans cette partie, à travers l'exemple de l'écriture, la difficulté d'étudier l'apport d'une technologie de manière globale, dans un contexte éducatif. De nombreux facteurs, qu'ils soient technologiques pédagogiques ou humains, font qu'il est très difficile d'évaluer de manière globale une technologie et peuvent amener à des raccourcis qui peuvent être contre-productifs. Les exemples précédents concernant les écrans rétroéclairés et l'écriture en sont la preuve. Il devient donc très difficile d'évaluer l'impact réel de la tablette sur les processus cognitifs mis en jeu.

Pour essayer de pallier à toutes ces difficultés, nous proposons donc dans ce travail de ne pas étudier de manière globale l'impact de la tablette sur l'apprentissage, mais de nous centrer sur :

1. L'étude d'une fonctionnalité spécifique à la tablette tactile.
2. Une situation d'apprentissage spécifique.
3. L'impact cognitif de cette fonctionnalité dans cette situation d'apprentissage.

Pour terminer cette première partie, il est maintenant temps d'évoquer dans les deux chapitres suivants, les spécificités de la tablette tactile que nous retiendrons dans nos études et définir les tâches d'apprentissages spécifiques qui nous intéressent. Il sera alors temps de détailler le cadre théorique à convoquer pour notre étude.

1.3.2 Nécessité d'étudier isolément les caractéristiques des tablettes sur l'apprentissage : mobilité et interactions tactiles

Dans cette partie, nous détaillerons les spécificités des tablettes tactiles et expliqueront la nécessité d'étudier de manière isolée chacune de ces caractéristiques pour en déterminer

l'impact sur l'apprentissage. Les deux caractéristiques principales des tablettes tactiles qui découlent de leur technologie sont d'après Betrancourt (2012), leur mobilité et l'aspect tactile de l'interaction.

Avec une masse avoisinant les 700 g, une taille restreinte (environ 10 pouces) et l'absence de clavier physique, la tablette tactile est un outil facilement manipulable et donc utilisable en situation de mobilité. Cette dernière est facilitée par l'intégration des outils à la tablette comme les outils de captation d'images (photos et vidéos). Dès lors, de nouvelles perspectives d'apprentissage dans un environnement réel, comme un musée par exemple, sont permises. L'utilisation de la réalité augmentée peut de plus, rendre ces expériences d'apprentissage plus immersives. Cette partie de l'apprentissage fait d'ailleurs partie d'un domaine de recherche très actif ces dernières années en EIAH : l'apprentissage ubiquitaire (Gicquel, 2010). Cette perspective d'une expérience d'apprentissage plus immersive, pour l'utilisateur, n'est dès lors pas très éloignée d'une perspective incarnée de la cognition. Cependant, ces situations d'apprentissages en mobilité, tout aussi passionnantes soient-elles, restent très éloignées du quotidien des élèves dans les classes, pour le moment. Nous ne les envisagerons donc pas dans la suite de ce travail.

La deuxième rupture technologique apparue avec l'essor des technologies mobiles concerne la nature de l'interaction entre l'utilisateur et l'outil. L'utilisateur interagit directement avec la tablette sur l'écran, sans dispositif annexe comme pouvaient l'être le clavier et la souris. L'écran est en effet capable de détecter plusieurs points de contact et donc d'interpréter différents gestes réalisés par l'utilisateur. Les écrans de ces outils, dit tactiles, sont donc dotés d'une technologie multipoint également couramment appelé Multitouch. Comme le précise Betrancourt (2012), la signification de l'interaction s'en trouve modifiée : le geste devient porteur de signification et l'interaction Multitouch réintroduit la coordination œil-main. Examinons donc plus en détails ces deux aspects de l'interaction Multitouch.

1.3.2.1 Interaction tactile et nature des gestes

Les exemples souvent évoqués pour décrire le caractère naturel du geste sont par exemple, le geste consistant à tourner les pages d'un livre numérique sur la tablette, similaire au geste réalisé sur un livre ou encore le fait d'écarter deux doigts pour de-zoomer ou zoomer sur l'écran (geste *pinch to zoom* ou *spread to zoom*). Une interface Multitouch permet cependant de réaliser une multitude de gestes, du plus simple, le tap à un doigt sur l'écran, à des gestes beaucoup plus évolués pouvant nécessiter de mettre en œuvre simultanément 4 ou

5 doigts par exemple. Toutefois, la majorité des actions implémentées sur une tablette peuvent être réalisées avec des gestes nécessitant un ou deux doigts. Villamor, Willis et Wroblewski (2010) ont réalisé un guide de référence présentant une dizaine de gestes de base permettant de réaliser la majorité des actions sur une tablette Multitouch.

Ces gestes implémentés par les constructeurs sont-ils pour autant tous naturels pour les utilisateurs ? La situation semble, en effet, plus complexe. Wobbrock, Morris et Wilson (2009) ont réalisé une étude qui consistait à montrer à des utilisateurs une animation sur un objet et à essayer de produire ensuite le geste qui leur semblait le plus adapté pour produire cette action sur l'objet étudié. Ils ont répété cela sur 27 cas d'usages différents sur des objets 2D. Cela a permis d'analyser plus de 1000 gestes produits pour arriver à extraire un jeu de gestes considéré le plus représentatif, des gestes réalisés par les utilisateurs. Ce jeu de gestes a été réalisé à partir des gestes revenant le plus chez les utilisateurs pour une même action. Le plus intéressant dans cette étude est que les trois auteurs, spécialistes dans les interactions homme-machine, ont réalisé en amont la même expérience et qu'une majorité des gestes qu'ils ont réalisés ne se retrouve pas dans le jeu de gestes utilisateurs produits. Les gestes pensés par des spécialistes, ne sont pas forcément représentatifs des gestes imaginés par les utilisateurs, pour produire la même action.

Ces auteurs ont de plus remarqué que les gestes produits par les utilisateurs dans leur jeu de gestes étaient pour la majorité (72%) une transposition des actions habituelles, réalisées à la souris, pour réaliser la même action. Pour un utilisateur lambda, le caractère naturel d'un geste ne serait-il donc pas influencé par des années d'habitude d'interaction avec une souris sur un ordinateur ? Il a été également noté que pour une même action de nombreux gestes pouvaient être produits en fonction de l'utilisateur. Cette disparité des gestes entre utilisateurs a également été observée dans une étude similaire portant cette fois sur la mise en mouvement d'un cube en 3D où il était demandé aux utilisateurs de produire des gestes permettant le déplacement du cube, sa rotation autour d'un axe et ainsi qu'une mise à l'échelle de cet objet (Cohé & Hachet, 2012).

Les résultats précédents portaient sur la réalisation d'une tâche simple et unique bien loin d'une utilisation quotidienne d'une tablette. Et dans ce cas, la situation devient encore plus complexe comme l'ont montré Hinrichs et Carpendale (2011) en étudiant le comportement d'utilisateurs, sur une table interactive, dans un aquarium comportant une multitude de ressources à explorer librement. Les résultats de leur investigation sont que les gestes choisis par les utilisateurs ne peuvent être étudiés indépendamment les uns des autres.

En effet, ils s'inscrivent dans une continuité d'action et les utilisateurs choisissent des gestes permettant la fluidité de cette continuité d'action. Par exemple, des gestes à deux doigts ont été utilisés pour réaliser des actions de glisser-déplacer quand celles-ci arrivaient après un geste à deux doigts de *pinch-to-zoom* servant à ajuster la taille de l'objet.

Enfin, la situation se complexifie encore quand plusieurs personnes peuvent interagir simultanément sur la table interactive. Toujours dans la même étude, Hinrichs et Carpendale (2011) ont montré que le geste choisi pouvait également avoir une origine sociale. Dans ces situations, des actions de mimétisme ont été observées entre les utilisateurs. De même, des gestes peu invasifs étaient produits pour ne pas obstruer une partie de la surface aux autres utilisateurs. Enfin, Derboven, De Roeck et Verstraete (2012) ont montré que les utilisateurs ne pouvaient deviner, seuls, la totalité des gestes implémentés sur une interface et que donc certains gestes devaient être expliqués. De plus, même une fois connus, ces gestes ne sont pas pour autant réalisés correctement par tous les utilisateurs. Par exemple, ces auteurs ont constaté que certains utilisateurs utilisaient deux mains pour réaliser le geste *pinch-to-zoom* et que certains gestes mal réalisés amenaient à des erreurs dans les actions réalisées.

On peut donc conclure, ici, que le caractère naturel d'un geste sur une interface Multitouch ne sera pas évident pour tous les utilisateurs. La modalité d'interaction tactile offerte par les tablettes n'est donc pas forcément gage d'une facilitation de l'interaction avec les contenus. Cette interaction n'est pas forcément plus « naturelle ». Pour étudier l'effet sur une tâche d'apprentissage des gestes réalisés en Multitouch, il faut donc, dans un premier temps, prendre la précaution d'expliquer les gestes aux utilisateurs et leur permettre une phase d'entraînement. Enfin, la nature même de la tâche, peut par sa complexité ou par les interactions qu'elle met en jeu avec d'autres personnes, influencer sur la réalisation des gestes par les utilisateurs. Afin d'éviter ces problèmes qui pourraient rendre l'analyse des résultats obtenus plus difficile, nous verrons dans la prochaine partie comment bien spécifier la tâche étudiée.

1.3.2.2 Interaction tactile et coordination œil-main

Le deuxième avantage de l'interaction tactile serait le rétablissement de la coordination œil-main, perdue lors de l'utilisation d'une souris. Cette coordination est la base de toute action visant à saisir un objet. Commençons par décrire cette coordination et les conséquences de l'utilisation d'un environnement informatique classique sur ce mécanisme, pour essayer d'en déduire des avantages de l'interaction Multitouch.

L'analyse de la saisie d'un objet réel, par une personne, met en jeu en premier lieu une large saccade oculaire en amont de l'objet à saisir suivie de plusieurs petites saccades correctives jusqu'à la saisie. La main effectue un pattern similaire commençant par un large mouvement suivi de plusieurs petits mouvements correctifs (Helsen, Elliott, Starkes, & Ricker, 1998). Dans les environnements informatiques, avant l'arrivée de l'écran tactile, des dispositifs de pointage déportés (souris, *TrackPad*) étaient utilisés entraînant la perte de la coordination œil-main au profit d'une coordination œil-curseur sur l'écran. Les mouvements de ce dernier étaient une transposition des mouvements physiques de la main réalisés, sur le dispositif de pointage. Smith, Ho, Ark et Zhai (2000) ont étudié cette nouvelle coordination pour rechercher si un nouveau pattern de coordination pouvait être établi. Et là encore, comme avec la diversité des gestes, plusieurs patterns furent observés : pour certains utilisateurs, le regard suivait le curseur vers la cible alors que pour d'autres le regard conduisait le curseur vers la cible. Plus rarement, un comportement de *switch* du regard entre le curseur et la cible jusqu'à que cette dernière soit atteinte a été observé. Et, comme dans le cas de l'analyse des gestes, la situation se complexifie avec la nature de la tâche. Dans l'observation de tâches réelles de travail d'utilisateurs, Liebling et Dumais (2014) ont montré que l'environnement et l'habitude des utilisateurs influençaient le pattern de coordination utilisé par ces derniers. Par exemple, quand il s'agit de cliquer sur le menu démarrer de Windows, toujours situé en bas à gauche et sachant que le curseur de la souris ne peut quitter l'écran, peu d'utilisateurs utilisent un pattern consistant à fixer en premier lieu le regard sur la cible. Ce dernier n'intervient qu'en fin d'action pour la réalisation fine de la tâche.

Le rétablissement de la coordination œil-main dans les interfaces Multitouch est-il pour autant toujours bénéfique ? Certes, ce rétablissement permet de se rapprocher de la situation naturelle de saisie d'un objet, du moins jusqu'au contact avec ce dernier. En effet, une fois ce contact effectué, il manquera à l'utilisateur le retour haptique produit par un objet réel en trois dimensions. Il a également été montré que cette interaction directe était plus rapide qu'avec une souris mais qu'elle pouvait cependant devenir un obstacle lorsque l'objet à sélectionner devenait plus petit que le doigt (Cockburn, Ahlström, & Gutwin, 2012). Dans ce cas, ce dispositif de pointage devient moins efficace que la souris. Pour les déplacements d'objets, la souris est là aussi, plus efficace (Cockburn et al., 2012). Pour remédier à ce problème, de masquage de la main sur des petits objets, lors d'une interaction Multitouch, Pfeuffer, Alexander, Ki Chong et Gellersen (2014) ont proposé une interface combinant la manipulation d'un objet au doigt en Multitouch avec une méthode originale de sélection de ce

dernier par le regard et manipulation déportée. Cette technique rompt cependant la coordination œil-main et interdit de plus les sélections multiples d'objets.

La souris reste donc un outil de pointage très efficace comme nous venons de le voir mais c'est un outil qui demande le plus d'efforts cognitifs et de coordination motrice. Cela peut devenir problématique pour des personnes âgées ayant peu d'expérience de l'utilisation de l'outil informatique (Wood, Willoughby, Rushing, Bechtel, & Gilbert, 2005). Pour autant, en comparant divers outils de pointage l'écran tactile est moins apprécié par des séniors ayant peu d'expérience des ordinateurs que des outils de pointage indirect comme une souris avec trackball (Wood et al., 2005). Ceci étant, l'écran Multitouch réduit les différences de performance entre jeunes adultes et personnes plus âgées sur les principales tâches de sélection et de manipulations d'objets comparativement à la souris (Findlater, Froehlich, Fattal, Wobbrock, & Dastyar, 2013).

Nous avons décidé de nous intéresser à deux aspects spécifiques de la tablette tactile. La manipulation à partir de gestes et le rétablissement de la coordination œil-main. Malgré ce choix de recentrage sur des points spécifiques de la tablette, les études montrent qu'il reste difficile de dégager des conclusions sur les bénéfices potentiels de ces points tant des disparités existent selon l'âge ou l'expérience de l'outil des utilisateurs (Findlater et al., 2013; Wood et al., 2005).

Ces disparités sont de plus augmentées quand le contexte devient trop écologique et que les utilisateurs ne sont pas contraints à une tâche particulière comme nous l'avons évoqué pour la visite de l'aquarium (analyse des gestes) (Hinrichs & Carpendale, 2011) ou pour les situations réelles de travail sur ordinateur (analyse de la coordination œil-main) (Liebling & Dumais, 2014).

Nous allons donc maintenant discuter de la nécessité de bien spécifier la tâche d'étude avec des tablettes tactiles, pour essayer de rechercher les avantages d'un des points techniques évoqués dans cette partie, à savoir l'aspect plus naturel du geste ou le rétablissement de la coordination œil-main.

1.3.3 Nécessité de prendre en compte la nature des tâches réalisées avec la tablette

Nous avons précédemment évoqué deux axes d'analyse de l'apport des tablettes tactiles : les progrès d'apprentissage liés à la tablette et/ou la perception des utilisateurs vis-à-vis de cette dernière dans un contexte d'apprentissage. Ces deux points peuvent sans problème être étudiés lors d'une même étude même si les résultats des perceptions des

utilisateurs ne reflètent pas forcément les résultats d'apprentissage comme cela a été montré au sujet de l'écriture dans l'étude de Ling (2016). Nous avons alors supposé, que dans cette étude, les fortes disparités sur les préférences de modalité d'écriture dans les perceptions observées, provenaient probablement d'effets d'entraînement au sein des établissements : en effet, la nature des activités d'écriture proposées par les enseignants dépend aussi probablement de leur propre ressenti vis-à-vis de l'écriture sur tablette. Nous pensons donc, qu'il semble difficile d'étudier l'influence de la tablette pour une tâche spécifique, sans tenir compte des expériences antérieures des participants, vis-à-vis de cet outil.

Pour éviter ces probables effets d'entraînement, Amadiou, Pecoste, Mariné, Leemput et Lescarret (2016) ont pris le soin de réaliser une étude avec des étudiants ne possédant pas de tablettes tactiles et ne les utilisant donc pas régulièrement en classe. Ils ont analysé les représentations des élèves concernant les tablettes sur deux types de tâches courantes en éducation : une tâche de lecture et de navigation (utilisée dans la recherche d'information) et une tâche d'écriture (utilisée dans la prise de notes). Ces représentations ont été mesurées avant et après utilisation de la tablette. Les élèves, bien que n'utilisant pas de tablettes tactiles, percevaient positivement la tablette avant utilisation pour la tâche de lecture et navigation et négativement pour la tâche d'écriture. Cet effet, a été renforcé après l'exécution de la tâche concernée.

Comme les étudiants n'avaient pas utilisé de tablettes avant l'étude, d'où pouvaient venir ces représentations initiales ? S'agissait-il d'une projection de leurs usages avec un smartphone sur la tablette ? Ces étudiants avaient-ils intégré les usages censés être plus adaptés à l'utilisation d'une tablette et fortement relayés dans les médias ou les milieux scolaires ? Quelle que soit l'origine de ces représentations initiales, le point le plus intéressant est que l'utilisation de la tablette pour réaliser la tâche, a accentué ces représentations. Mais cet effet était-il réellement lié à l'utilisation de la tablette dans cette tâche d'écriture ?

L'absence de situation de comparaison avec une activité identique sur ordinateur ou sur papier et le type de tâche d'écriture choisi, font qu'il nous paraît à ce stade hasardeux, d'en conclure, que la tablette tactile est inadaptée à l'écriture. En effet, il nous semble que les deux types de tâche n'étaient pas identiquement stimulantes. La tâche de lecture et de recherche d'informations consistait à extraire des informations sur les gorilles et ensuite de répondre à des questions sur le sujet. Ce type d'activité, qui se rencontre très souvent dans des situations d'apprentissage, peut très probablement intéresser des étudiants. La tâche d'écriture consistait à retranscrire un texte, soit donné sur une feuille de papier, soit énoncé à l'oral sous

la forme d'une dictée. Ce type de tâche d'écriture n'est pas représentatif de la prise de notes d'un cours et ne nous semble pas faire partie des activités cognitivement stimulantes pour des étudiants.

Après avoir montré la nécessité d'isoler une caractéristique technique de la tablette pour étudier les bénéfices de la tablette tactile, nous venons de montrer sur l'exemple de l'écriture la difficulté de caractérisation d'une tâche. Cela nous semble pourtant nécessaire pour proposer des recommandations éclairées sur l'utilisation d'un outil. Parler de l'écriture est trop général. En effet, on peut étudier l'écriture à trois niveaux selon l'âge et les besoins des utilisateurs : production de lettres, de mots ou de textes. Et, concernant l'apprentissage de l'écriture, l'étude de Jolly et Gentaz (2013) a montré des bénéfices à utiliser des tablettes tactiles pour s'entraîner à écrire des lettres cursives avec des enfants de cours préparatoire. Notons ici, que l'écriture se faisait au doigt et non en utilisant le clavier intégré, puisqu'il s'agit d'écriture cursive car l'écriture numérique avec un clavier se distingue également de l'écriture cursive. Enfin, même si l'on cantonne l'écriture à la production de textes, produire un texte pour répondre à une évaluation, pour prendre des notes ou pour retranscrire un texte papier ou oral sont trois activités différentes d'écriture.

Dans la suite de ce travail, nous proposons donc d'étudier les bénéfices de la tablette tactile en termes de plus-value sur les résultats d'apprentissage en nous focalisant sur :

- L'apport d'une fonctionnalité technique : l'aspect tactile de l'interaction et la production de gestes associés.
- Un type de tâches spécifique : l'utilisation d'animations/simulations multimédias dans un domaine mettant en jeu des compétences spatiales.
- Des utilisateurs d'un profil identique : des lycéens ou des étudiants, non engagés dans un programme de dotation de tablettes tactiles en classe.

Pour conclure, cet état des lieux, nous allons dans le chapitre suivant examiner les cadres théoriques permettant de mener à bien cette recherche de l'influence du geste Multitouch sur une tâche d'apprentissage. En effet, si l'étude des bénéfices de la tablette tactile, en termes de résultats d'apprentissage, peut être intéressante pour justifier de l'utilisation ou pas, d'un tel dispositif en classe, il est difficile de généraliser les résultats et de faire des recommandations pour des usages ultérieurs, si l'on n'identifie pas les processus cognitifs mis en jeu (attention, mémoire de travail, cognition incarnée...). Comme l'ont expliqué Mulet et al. (2019) dans leur analyse des études sur les perceptions des utilisateurs vis-à-vis de la tablette tactile, la diversité des modèles théoriques utilisés dans les études ou

leur absence, rend ces dernières difficilement comparables entre elles. Nous essaierons donc, dans chacune de nos études, de prendre soin de bien analyser le cadre théorique dans lequel nous nous plaçons, pour essayer de bien voir les facteurs potentiellement impactés, par l'utilisation de l'interaction Multitouch avec une tablette tactile.

Chapitre 2 : Gestes et cognition

2.1 Introduction

Qu'ils envisagent l'étude de la tâche d'apprentissage de manière relativement générale en se focalisant sur les buts d'apprentissage comme dans le modèle de la charge cognitive (Sweller, 1988), ou en se basant sur des processus actifs en mémoire de travail dans le modèle de l'apprentissage multimédia (Mayer, 2005), la plupart des modèles théoriques actuels qui concernent l'apprentissage avec des outils multimédias ont été proposés avant la généralisation des interactions tactiles de type Multitouch. Même si diverses études, dont certaines réalisées par les auteurs de ces modèles, ont analysé depuis, les effets du geste dans l'apprentissage, le rôle de ce dernier n'a pas été clairement identifié pour permettre une refonte des modèles cités.

De plus, le rôle du geste dans l'apprentissage est souvent abordé dans une perspective de cognition incarnée, paradigme qui selon la façon dont on l'appréhende, peut-être de nature à redéfinir les frontières même de ce que l'on définit comme un processus cognitif. Cette approche, si elle est utilisée dans son acception la plus dure, peut donc être de nature à rendre plus difficile la mise en lien des effets du geste dans l'apprentissage avec les connaissances établies sur les processus cognitifs, utilisés lors d'une activité d'apprentissage. Mais le fait est que le terme *affordance* et l'aspect naturel des gestes sont souvent évoqués pour justifier les bienfaits de la tablette tactile. Il paraît donc difficile de ne pas envisager le problème sans tenir compte du paradigme de la cognition incarnée.

Nous détaillerons dans cette partie ce paradigme de la cognition incarnée et ses différents courants. Nous verrons également, quelles précautions prendre pour envisager les effets du geste dans une perspective incarnée de la cognition compatible avec le modèle cognitiviste de traitement de l'information. Ce dernier point, disons-le tout de suite, serait un non-sens absolu pour toute personne ayant une vision radicale de la cognition incarnée. Nous verrons enfin, le cas particulier du geste, dans le cadre d'une activité sur tablette tactile, en nous posant la question du mécanisme cognitif impliqué dans cette production de gestes en situation d'apprentissage.

Dans une troisième partie, nous conclurons cette approche théorique en discutant des habiletés visuo-spatiales. En effet, le geste est souvent associé au langage pour transmettre de l'information présentant un caractère spatial (étendue, distance...). Nous avons de plus

constaté qu'un aspect facilitateur du geste produit sur la tablette était souvent évoqué dans des situations mettant en jeu des compétences spatiales (navigation dans une interface de type Google Earth, animations scientifiques...). Enfin, dans une approche incarnée de la cognition l'accent est mis sur la place du corps et des actions réalisées dans l'environnement. Ce couplage, entre le sujet et son environnement est également de nature spatiale.

Avant de détailler plus longuement le paradigme de la cognition incarnée, nous allons commencer par un rapide tour d'horizon des trois principaux paradigmes en sciences cognitives en explicitant les différences entre ces trois points de vue. Une description assez détaillée de ces trois courants est disponible dans l'ouvrage de Francisco Varela : Invitation aux sciences cognitives (1997).

2.2 Cognitivism, connexionnisme et éaction

Le courant cognitiviste utilise la métaphore de l'ordinateur pour définir la cognition. Cette dernière est donc vue comme une activité, dans le cerveau, de traitement d'informations, issues du monde extérieur, basée sur une activité computationnelle de symboles. L'acte d'apprendre est donc vu comme une manipulation logique de symboles qui permet de faire émerger la connaissance stockée sous forme de représentations. La nature physique de ces représentations symboliques au sein de notre cerveau est cependant peu claire mais nous pouvons penser qu'il s'agit probablement d'une activité neuronale particulière, distribuée dans tout le système nerveux. Mais, après-tout, peu importe si le modèle permet d'expliquer les comportements et la manière dont un être vivant apprend. Cependant, la métaphore de l'ordinateur présente quelques inconvénients :

- Un ordinateur ne sait résoudre dans un temps fini qu'un problème décidable (un algorithme). Alan Turing a montré que certains problèmes étaient indécidables donc, la question qui se pose est de savoir si la cognition humaine peut toujours être traduite en problème décidable. Même si nous le répétons, il nous semble peu important de savoir comment est codé l'algorithme dans le cerveau et par qui il a été programmé à partir du moment où le modèle permet de décrire la réalité observable, il semblerait surprenant, vue la diversité des activités cognitives, qu'elles puissent être toutes transcrites sous la forme d'un algorithme. Et, de toutes façons, les implémentations de ce modèle en intelligence artificielle peinent à obtenir de bons résultats sur des tâches de base comme la reconnaissance de formes.

- Un ordinateur ne traite l'information que de manière séquentielle, ce qui devrait rendre toute activité d'apprentissage très lente vu le nombre d'informations à traiter.
- Dans un ordinateur chaque sous-unité présente une fonction particulière et la perte d'une sous-unité implique le non fonctionnement de la machine. Si tel était le cas comment expliquer les facultés d'adaptation du cerveau humain et les phénomènes de plasticité cérébrale dont il est capable de faire preuve ? Un système distribué comme les réseaux connexionnistes que nous allons décrire maintenant, semble préférable.

Le paradigme connexionniste se base sur un système de neurones formels dont l'organisation et le fonctionnement imitent le fonctionnement des systèmes de neurones physiologiques. Un réseau de neurones présentera un jeu de données en sortie en fonction des données d'entrées et des poids synaptiques accordés aux nœuds du réseau. Mais, surtout, le système sera capable de s'auto-organiser en modifiant les poids synaptiques des connexions pour obtenir un jeu de données en sortie satisfaisant pour l'expérimentateur. Il est donc capable d'apprendre (Victorri, 2008). La notion d'attracteur issue de la théorie des systèmes dynamiques en physique et que nous détaillerons plus loin est souvent évoquée pour caractériser l'état final d'un réseau de neurones. Ce paradigme présente deux points intéressants :

- Premièrement, il semble proche du fonctionnement biologique du cerveau.
- Deuxièmement, le fonctionnement des réseaux de neurones présente un caractère décidable : ils sont donc implémentables informatiquement et permettent donc facilement la simulation.

Actuellement, les réseaux de neurones donnent de bons résultats sur des tâches cognitives de base (reconnaissance de formes par exemple). Ils sont par contre très lents à apprendre et ne peuvent rivaliser avec nos facultés d'apprentissage (Dehaene, 2018). Les connexionnistes, conscients de ces limites, ne renient pas les représentations symboliques car ces dernières semblent indispensables pour expliquer des comportements de haut niveau (analyser des phrases, faire des déductions...). Ils placent leur modèle à un niveau sub-symbolique, entre le fonctionnement biologique et les symboles cognitivistes (Varela, 1997). Les points de vue cognitivistes et connexionnistes peuvent donc sembler complémentaires et certains chercheurs considèrent qu'ils permettent de bien décrire les processus cognitifs ascendants (connexionnisme) et descendants (cognitivisme). Dans les deux cas, la cognition

permet d'obtenir une bonne représentation du monde extérieur, qui est par nature prédéterminé ce que rejette Varela (1997) dans sa théorie de l'énaction.

L'énaction, théorie présentée par Varela rejette l'idée des représentations car elle rejette l'idée d'un monde extérieur prédéterminé. Pour Varela, une activité cognitive vise avant tout à répondre de manière pertinente aux situations que l'individu rencontre au cours de son existence : la pertinence de la réponse est dictée par notre sens commun. Ces réponses pertinentes ne peuvent en général pas être prédéfinies à cause de la complexité des situations : « dans les années soixante-dix, après deux décennies de très lents progrès, il apparut à plusieurs chercheurs en IA que même la plus simple action cognitive demande une quantité de connaissances apparemment infinie que nous prenons comme acquise » (Varela, 1997, p.95). On voit donc bien ici l'idée d'un monde aux contours infinis qui ne peut être programmé dans un ordinateur comme pourrait l'être celui des échecs. Programmer un ordinateur pour jouer aux échecs est une action simple. Programmer un robot humanoïde pour qu'il se déplace avec fluidité dans le monde extérieur demeure une chose excessivement complexe.

Pour Varela, ces connaissances ne peuvent donc être stockées. Il faut donc les faire émerger sur un arrière-plan : c'est ce que Varela appelle l'énaction. Contrairement aux réseaux connexionnistes dans lesquelles les réponses adéquates émergeaient seules, ici c'est l'interaction entre le sujet et l'extérieur qui fait émerger les réponses adéquates au problème posé. C'est à partir de ces interactions que chaque espèce se construit un monde qui lui est viable : par exemple, la vision trichromique des couleurs pour l'être humain, issue de la phylogénèse. Ce monde trichromique vécu est différent de celui de certaines espèces d'oiseaux qui ont développé une vision quadrichromique. Chacune de ces espèces a donc fait émerger un monde de couleurs qui lui permettait au mieux de vivre en adéquation avec l'extérieur. Enfin, pour Varela, l'expérience antérieure entre le sujet et le monde au cours de sa vie mais également l'héritage des diverses interactions entre les sujets et le monde extérieur qui a façonné les espèces joue donc un rôle central dans la théorie de l'énaction.

Varela pose là les prémices d'un courant émergent en sciences cognitives : la cognition incarnée que nous allons maintenant développer.

2.3 Le paradigme de la cognition incarnée

2.3.1 Origines

Qu'est-ce que la cognition incarnée ? Nous avons une première fois évoqué cette forme de cognition en parlant d'un couplage fort entre le sujet et l'environnement. Avant de détailler ce que cela représente, commençons par illustrer ce paradigme par un exemple. Dans

son ouvrage : *Supersizing the Mind: Embodiment, Action, and Cognitive Extension*, Andy Clark (2010) rapporte cette anecdote d'un dialogue entre Richard Feynman, prix Nobel de physique et l'historien Charles Weiner. Weiner évoque des notes et dessins de Richard Feynman comme une sauvegarde de son travail journalier. Feynman réagit vigoureusement à cette affirmation :

- « J'ai fait ce travail sur le papier dit-il » ?
- Weiner étonné, rétorqua : « Vous avez fait ce travail dans votre tête, mais son enregistrement est toujours là (évoquant la feuille de papier) ».
- Non ce n'est pas un enregistrement, pas vraiment dit Feynman. « Elle travaille » (notre traduction hasardeuse de « *it's working* »). Vous devez travailler avec le papier et c'est le papier. D'accord ?

Ce dialogue illustre bien la différence entre un point de vue cognitiviste comme peut l'avoir Weiner, pour qui la cognition est dissociée de l'action, et, le point de vue incarné de Richard Feynman qui considère son activité cognitive indissociable de l'écriture simultanée sur une feuille de papier. Ce couplage entre la perception, l'activité neuronale et l'action est le principe fondateur de la cognition incarnée que nous évoquerons dans la partie suivante.

Nous avons dans la première partie de ce travail plusieurs fois pris l'exemple de l'écriture en expliquant que l'acte d'écrire regroupait en fait différentes tâches. Ce dernier exemple serait par contre plutôt de nature à redéfinir l'acte même d'écrire. Nous pouvons donc avec humour nous poser cette question au sujet des découvertes de Richard Feynman. Aurait-il pu révolutionner aussi brillamment la mécanique quantique s'il avait dû travailler sur une tablette tactile ? Si l'on prend une approche cognitiviste de la situation nous répondrions que oui, mais que, probablement, ses notes en seraient moins complètes ou différentes du fait de la faible utilisabilité de la tablette tactile comparativement au papier. Avec une approche incarnée de la cognition, la réponse serait probablement que les découvertes de Feynman auraient pu prendre une tournure différente, voire ne jamais aboutir.

Richard Feynman vient de nous donner enfin l'occasion de tourner, dans ce travail, la page de l'écriture. En effet, nous avons déjà évoqué que cette tâche ne serait pas celle que nous étudierons dans cette thèse. Mais, nous resterons cependant dans le domaine de la physique car c'est celui que nous avons choisi de retenir pour étudier l'influence de l'interaction Multitouch dans une tâche d'apprentissage. Pourquoi ce domaine ? Simplement, car la compréhension de la physique mobilise des habiletés visuo-spatiales, elles-mêmes misent en jeu dans l'interaction Multitouch. Nous tenterons donc à partir de maintenant

d'illustrer nos propos à partir d'exemples pris dans ce domaine. Mais en premier lieu, commençons par voir en détails ce qu'est la cognition incarnée et d'où elle tire ses origines.

La cognition incarnée est un paradigme en sciences cognitives, issu de la phénoménologie, qui s'est bâti en récusant l'idée, défendue par de nombreux chercheurs du courant cognitiviste, de la séparation de la cognition et de son incarnation (dans un corps, dans un environnement biologique, psychologique et culturel) (Betrancourt, 2012).

On peut cependant trouver les prémices d'une approche incarnée de la cognition dans l'approche écologique de Gibson (1979). Dans son ouvrage « *The ecological approach to visual perception* », Gibson, envisage la perception comme un couplage entre l'être vivant et son environnement mais surtout introduit le fait que l'information perceptive est intrinsèque à l'environnement. Il introduit, notamment, le concept d'affordance, propriétés des objets incitant à l'action. Pour Gibson le fait qu'une chaise soit perçue comme un objet incitant à la position assise est une information intrinsèque de la chaise et ne découle pas d'une représentation réalisée par le cerveau, à partir des informations visuelles reçues sur la rétine. Il s'oppose en ce sens à la vision cognitiviste de traitement de l'information. Cette notion d'affordance n'a cependant de sens que si l'on considère le système être vivant-objet. L'affordance à s'asseoir d'une chaise trop haute n'existera pas pour un bébé selon les idées de Gibson. De même, une surface meuble comme de l'eau ne présentera pas d'affordance à marcher pour un être humain alors que ce sera le cas pour un insecte comme le Gerris (punaise d'eau) qui possède la faculté de se déplacer sur cette surface. Cette distinction entre le monde physique et le monde perçu avait, d'une certaine manière, déjà été énoncée par le biologiste allemand Jakob Von Uexküll dans son livre « Mondes animaux et monde humain » publié en 1934. Il y théorisait alors le concept d'*umwelt*, ou de monde propre, consistant à dire que chaque espèce animale se construit une représentation du monde en fonction des récepteurs sensoriels dont elle est dotée et des possibilités d'actions proposées par l'environnement pour sa survie. L'*umwelt* de la tique est donc délimité par les quelques stimuli qui lui sont accessibles. L'être humain, bien que partageant le même environnement que la tique, vivra dans un monde bien plus complexe du fait des 5 sens dont il est doté.

Mais, un des ouvrages qui est souvent cité comme fondateur par les tenants d'une vision incarnée de la cognition est « *The embodied Mind* » de Varela, Thompson et Rosch, (1991). Y est introduit l'idée d'énaction : le monde n'est pas donné tel quel, fini, mais c'est de l'interaction entre ce monde et l'organisme vivant que s'opère la cognition. Le cerveau va faire émerger, construire un monde viable pour l'être vivant. Le cerveau est donc vu comme un

organe qui construit des mondes, plutôt qu'il ne les réfléchit (Varela, 1997). Berthoz (2009, p.17, notre traduction) entretient cette idée et parle d'un cerveau projectif qui émule des mondes : « Le cerveau humain impose, de façon descendante, ses règles d'interprétation aux données sensorielles. Elle transforme le monde perçu selon des règles de symétrie, de stabilité et des lois cinématiques dérivées de principes de fluidité maximale. Ces règles suivent des principes de simplification qui permettent de simplifier la neurocomputation pour accélérer l'action ».

2.3.2 Cognition incarnée et cognition incarnée radicale

Bien que la cognition incarnée fasse partie des courants en vogue dans le courant des sciences cognitives, il existe plusieurs visions de ce courant avec différents niveaux d'incarnation. Pour les tenants les plus radicaux il faut lorsque l'on parle de cognition incarnée bannir le concept de représentations dans la cognition. Cette vision est décrite par Anthony Chemero (2011) dans son ouvrage intitulé « *Radical embodied cognitive science* ». Elle se veut héritée de la théorie écologique de Gibson et prend comme principe fondateur la théorie des systèmes dynamiques non linéaires et le rejet des représentations dans le domaine de la cognition. (Thelen & Smith, 1994; Thelen, Schöner, Scheier, & Smith, 2001).

Pour Chemero (2011, p.29, notre traduction), la cognition incarnée radicale repose sur trois piliers :

1. Les aspects représentationnels et computationnels de la cognition incarnée sont erronés.
2. La cognition incarnée doit être expliquée au moyen d'un ensemble particulier d'outils T, qui comprend la théorie des systèmes dynamiques.
3. Les outils explicatifs de l'ensemble T ne reposent pas sur des représentations mentales.

Les points 1 et 3 ne sont que le reflet du point de départ de ce paradigme, à savoir le rejet du cognitivisme et donc des représentations et de la computation de symboles utilisées pour expliquer la cognition. Pour comprendre le point 2 et l'appel à la théorie des systèmes dynamiques, il faut revenir à un point fondateur de l'approche incarnée évoquée précédemment dans les approches de Gibson et de Varela : le couplage entre l'individu et le monde. C'est de ce couplage et de la présence (ou non) des interactions adéquates entre les sujets et le monde qu'émergera (ou pas) la connaissance. Ce couplage dynamique peut donc être modélisé, comme la plupart des systèmes auto-organisés complexes, par la théorie des

systèmes dynamiques. Nous détaillerons cela un peu plus loin dans le texte, mais en premier lieu, prenons un exemple de ce qu'est ou n'est pas la cognition incarnée.

Un exemple souvent repris par les tenants de ce courant pour justifier de l'aspect incarné de la cognition est le problème du joueur de champ extérieur (*outfielder* ou voltigeur) au baseball (Wilson & Golonka, 2013). Ce problème, que tout enseignant de physique aura demandé à ses élèves de résoudre en appliquant les lois de Newton, va trouver d'autres solutions dans une approche incarnée de la situation. Il sera d'ailleurs le support d'une des expériences que nous avons réalisé et décrite plus loin dans ce travail. Mais quel est donc le problème du voltigeur au baseball ?

Un joueur de champ extérieur (voltigeur) doit au baseball rattraper les balles en l'air envoyées par le frappeur de l'équipe adverse avant que cette dernière ne touche le sol. Voici comment est décrite cette situation, en prenant d'abord une approche « classique » basée sur les représentations et ensuite avec une approche incarnée :

- Approche classique : le point d'impact de la balle avec le sol est déterminé, en appliquant les lois de la mécanique newtonienne, par l'angle de départ de la balle avec l'horizontale et la vitesse initiale de cette dernière. Nous négligerons ici pour simplifier la situation les frottements de l'air et toutes les perturbations extérieures. En modélisant cette situation par une situation simplifiée mais utilisable, ne sommes-nous pas en train de réaliser une représentation mentale de la situation ? Si le joueur tient le même raisonnement, il ne lui reste plus qu'à observer le départ de la balle, en déduire les paramètres du mouvement (angle de départ et vitesse initiale) pour estimer la position d'arrivée de la balle. Il n'aura plus qu'à courir vers ce point en ligne droite (sans même suivre la balle des yeux...)
- Approche incarnée : le joueur de champ ne peut utiliser des représentations pour résoudre la tâche. Il dispose par contre de ressources : il peut tout d'abord visuellement percevoir les paramètres cinématiques de la balle (position dans l'espace et variation de sa vitesse au cours du temps) et dispose de son corps pour se mouvoir dans l'espace. A ce stade, deux stratégies sont possibles et toutes deux reposent sur le fait que la vitesse horizontale de la balle est constante. Soit le joueur se déplace sous la balle en faisant en sorte que la vitesse de cette dernière soit constante, soit il se déplace de côté, en faisant en sorte que la trajectoire de la balle lui apparaisse comme une ligne droite par rapport à l'environnement. Une description mathématique de ces deux stratégies est disponible dans l'article de

McBeath, Shaffer et Kaiser (1995). Ces auteurs ont d'ailleurs montré, que la deuxième stratégie mettant en œuvre la faculté de discriminer des invariants géométriques, était plus facile à mettre en œuvre, que la première, qui nécessite de discriminer des accélérations. C'est la stratégie la plus utilisée par les joueurs de champ mais c'est également la stratégie de déplacement utilisée par les chiens pour attraper un frisbee. (Shaffer, Krauchunas, Eddy, & McBeath, 2004)

Confrontons maintenant ces deux points de vue à la réalité du terrain. Si la première stratégie mettant en jeu des représentations était utilisée, les joueurs de champ auraient donc toujours des courses en ligne droite car le problème se résume à aller d'un point A à un point B, connu à l'avance. Dans la vision incarnée les trajectoires des joueurs seraient par contre curvilignes, ce qui sans grande surprise correspond à la réalité.

Ceci étant dit, nous allons maintenant faire une rapide analyse de la cognition incarnée radicale qui paraît très intéressante sur certains points mais nous semble présenter quelques inconvénients.

L'exemple précédent semble valider le modèle proposé de cognition incarnée radicale. Et c'est tant mieux pour les joueurs de baseball : ils n'ont pas besoin de comprendre les lois de Newton pour devenir de bons joueurs. Notre cerveau, ainsi que celui des chiens et probablement de beaucoup d'espèces « intègre déjà un modèle des lois de Newton » ce qui nous permet d'évoluer simplement dans notre environnement alors que ce problème est excessivement complexe (Berthoz, 2008, 2009; McIntyre, Zago, Berthoz, & Lacquaniti, 2001). Le joueur de baseball n'a donc plus qu'à adapter son comportement au modèle interne présent dans nos circuits neuronaux, et/ou inversement. Si nous voulions être critique, sur cet exemple nous pourrions questionner le fait de savoir si ce comportement des joueurs de baseball est inné, ou recommandé par des entraîneurs qui auraient, comme l'ont fait McBeath et al. (1995), usé de représentations mathématiques, pour en déduire le comportement idéal des joueurs de base-ball. Mais force est de constater, que si d'autres espèces, comme les chiens, adoptent le même comportement, il est fort probable que les tenants de la cognition incarnée aient raison au moins sur ce type d'exemple. Mais pour autant, comment arriver à bannir les représentations des activités cognitives et arriver à proposer un modèle plus général qui rende compte de la variété des situations d'apprentissage ? Nous pensons plus particulièrement à la manipulation de concepts abstraits.

Les tenants de la cognition incarnée radicale s'appuient donc, comme évoqué précédemment, dans la deuxième caractéristique de la cognition incarnée radicale, sur la

théorie des systèmes dynamiques. Cette théorie, issue de la dynamique des systèmes, présente un haut degré de généralité. Elle est d'ailleurs, comme nous l'avons rapidement évoquée avec la notion d'attracteur, mise en œuvre dans certains réseaux de neurones connexionnistes. Elle s'attache originellement à essayer de décrire l'évolution des systèmes complexes qu'ils soient physiques (évolution de la météo par exemple) ou chimiques (évolution de transformations chimiques complexes). On modélise donc le système étudié par un jeu d'équations différentielles et l'objectif est d'arriver à prédire son comportement final, c'est-à-dire déterminer les valeurs limites des solutions des équations différentielles. Pour cela, on tient compte des conditions initiales appliquées au système et on ajuste les paramètres de l'équation différentielle en fonction des perturbations rencontrées par ce dernier au cours du temps. Cette théorie a depuis été appliquée à divers domaines comme au domaine économique et donc au domaine de la cognition par Thelen et Smith (1994).

Dans la théorie des systèmes dynamiques appliquée au comportement humain, ce dernier ne dépend plus seulement de processus descendants (de type *top-down*) dans lesquels les modèles internes du cerveau imposeraient le comportement de la personne. Ce comportement émergerait de la pratique d'expériences sensorimotrices nouvelles, donc de processus montants (*bottom-up*) qui permettraient la réorganisation de structures neuronales et de ce fait modifieraient la pensée, comme dans l'étude de la préhension des objets ou dans le cas classique de l'erreur A non B chez les bébés (Corbetta, 2000). Cette théorie, ne nous semble pas incompatible avec les découvertes réalisées en neurosciences sur le fonctionnement du cerveau : un cerveau qui possède un modèle du monde acquis lors de l'évolution des espèces qu'il projette sur le monde réel et dont l'être vivant en fonction des différentes interactions qu'il a sur ce monde ajuste les paramètres internes (Dehaene, 2018). Mais, là où les cognitivistes utilisent le terme modèle du monde issu pour partie de la phylogénèse et qui se développe dans l'ontogénèse, les tenants des systèmes dynamiques ne verront que des phénomènes biologiques modélisés par la théorie des systèmes dynamiques.

Nous venons de présenter succinctement la cognition incarnée radicale et il nous faut dès lors exprimer une première interrogation sur cette vision. En effet, force est de constater que les exemples souvent présentés sont des exemples d'acquisition de connaissances, que nous pouvons qualifier de connaissances procédurales. La finalité de ces dernières reste en fait la mise en œuvre d'une action. Mais dès lors, comment utiliser la cognition incarnée radicale pour expliquer des processus cognitifs de haut niveau comme dans les tâches scolaires ? Nous pensons, comme Bara et Tricot (2017), que le rejet des représentations reste

un défi pour l'explication et la compréhension des comportements complexes et la construction de connaissances conceptuelles. Cette difficulté est également décrite par Jouen et Molina (2007) pour qui la théorie des systèmes dynamiques est d'une grande puissance pour rendre compte du développement sensorimoteur mais beaucoup moins convaincante pour expliquer les composantes cognitives du développement. Nous rejoignons ces points de vue et dans ce travail nous adopterons donc une approche similaire à celle évoquée par Clark (2010, p.219, notre traduction) :

« La cognition incarnée ne remet pas en cause toutes les "métaphores de la machine" et n'implique pas nécessairement le rejet d'activités cognitives exprimées en termes de représentations et de calculs. Face au kaléidoscope des cas rencontrés, la réponse appropriée est de voir l'esprit et l'intelligence eux-mêmes comme mécaniquement réalisés par des mélanges complexes et changeants de couplages énergétiques et dynamiques, de formes internes et externes de représentations et de calculs, de formes épistémiques d'actions physiques, et l'exploitation astucieuse d'une variété d'accessoires, de moyens et de supports extra corporels. »

Cette dernière vision, beaucoup moins radicale, ouvre des portes pour envisager les apports du corps et de l'environnement sur les différents processus cognitifs comme ont pu le faire Paas et Sweller (2011) avec leur théorie de la charge cognitive.

Avant d'évoquer les avancées proposées par Paas et Sweller (2011), rappelons brièvement les concepts sur lesquels repose la théorie de la charge cognitive (Chanquoy, Tricot, & Sweller, 2007). Le premier des concepts est que la capacité de la mémoire de travail est limitée. Le deuxième point est que toute tâche visant à l'acquisition de connaissances, nécessite la mobilisation d'une quantité de ressources de la mémoire de travail. On appelle charge cognitive la quantité de ressources mobilisée. Toute augmentation des ressources cognitives mises en jeu comme par exemple un engagement plus important dans la tâche, augmentera cette charge cognitive. Si cette charge cognitive dépasse les capacités de la mémoire de travail, on parle de surcharge cognitive et ce phénomène devient préjudiciable à l'apprentissage. Il existe trois types de charges cognitives :

- La charge cognitive intrinsèque liée à la structure même des informations à acquérir.
- La charge cognitive inutile liée à la présentation des informations dans la tâche.

- La charge cognitive pertinente liée à l'effort pour automatiser les schémas pertinents.

Dans leur article, Paas et Sweller (2011), distinguent deux types de connaissances. Les connaissances biologiques primaires, nécessaires à l'adaptation et à la survie de l'espèce dans son milieu et dont l'évolution a favorisé l'acquisition. L'acquisition de ces connaissances est peu coûteuse en ressources en mémoire de travail et l'acquisition de ces connaissances n'est pas impactée par la limitation de la mémoire de travail. Cette limitation de la mémoire de travail devient par contre, prépondérante, lors du traitement d'informations destinées à l'acquisition de connaissances culturelles, nommées connaissances biologiques secondaires et dont l'évolution n'a pas favorisé l'acquisition. Ces apprentissages sont conscients, coûteux et nécessitent des efforts. Les apprentissages scolaires sont de ce type et toute action visant à limiter la charge cognitive d'une telle tâche sera bénéfique pour l'apprentissage. Il est donc légitime que de nombreuses études portant par exemple sur l'apprentissage à partir d'animations aient cherché les moyens de diminuer la charge cognitive, souvent rendue élevée par le caractère transitoire des animations. Pour faire baisser la charge cognitive, il faut faire baisser la charge inutile ou la charge pertinente. En effet, la charge intrinsèque est liée à la structure des informations à acquérir et semble donc peu modifiable.

Paas et Sweller (2011) proposent donc que des mécanismes mettant en jeu des connaissances biologiques primaires puissent interférer avec les connaissances biologiques secondaires. Un premier moyen proposé est le travail collaboratif. Ce dernier revient à partager la charge intrinsèque de la tâche, entre plusieurs individus et donc à faire baisser la charge individuelle. Cependant une charge additionnelle de coordination et d'échange via la communication entre les membres apparaît. Si cette dernière reste du type connaissance primaire (c'est-à-dire mettant en jeu une organisation ou une communication pas trop spécifique à la tâche), son coût restera faible. Cette première piste n'entre cependant pas dans le cadre de notre étude. La deuxième proposition, par contre, cadre avec la recherche menée dans ce travail. Paas et Sweller (2011) avancent que des connaissances biologiques primaires comme les gestes ou la manipulation d'objets, observés ou réalisés, pourraient favoriser l'acquisition de connaissances biologiques secondaires, en diminuant la charge en mémoire de travail. Les exemples portent sur l'observation et la réalisation d'actions motrices pour réaliser des origamis ou des puzzles. Les auteurs relèvent d'ailleurs bien cela :

« Bien que ces études aient utilisé des tâches associées à des mouvements humains, il pourrait être utile que les recherches futures se concentrent sur la question de savoir, s'il est

efficace, pour l'apprentissage, de faire appel au mouvement humain lors de l'enseignement de connaissances non motrices. » (Paas & Sweller, 2011, p.35, notre traduction) C'est donc tout l'intérêt de ce travail : rechercher, à travers l'utilisation de gestes Multitouch, les effets d'une action motrice sur l'apprentissage de connaissances non procédurales.

A quoi peut-on donc imputer cette baisse de charge en mémoire de travail liée au geste ? Si nous regardons du côté des affirmations des partisans de la cognition incarnée, une des caractéristiques, la plus souvent citée, au sujet de la cognition incarnée est qu'une partie de l'activité cognitive peut être « déchargée » sur l'environnement (Wilson, 2002). Le fait de s'appuyer sur des interactions entre le sujet et l'environnement permettrait donc une baisse de la charge en mémoire de travail, libérant ainsi des ressources pour d'autres traitements cognitifs. Cela permettrait ainsi la construction d'un modèle mental de la tâche plus élaboré. C'est possible, mais cela n'explique pas les mécanismes mis en jeu et la compréhension de ces derniers reste le deuxième objectif de ce travail. Pour essayer de comprendre quels mécanismes cognitifs peuvent être impliqués dans le cas qui nous intéresse, à savoir la production de gestes, nous allons donc devoir nous intéresser aux liens qui existent entre les gestes et les activités cognitives : quels types de gestes ont été utilisés et avec quels résultats pour un type d'apprentissage donné ?

2.4 Le geste dans les activités cognitives

Avant de détailler les différentes formes que peuvent prendre les gestes lors d'activités d'apprentissage commençons par nous poser la question de ce que ce terme, geste, recouvre. Les gestes accompagnant souvent la parole, il est donc logique que le domaine de la linguistique s'y soit intéressé. Une définition du geste est donnée par (Tellier, 2010, p.1) : « Nous utiliserons ici le terme geste pour ne désigner que les mouvements des mains et des bras, produits avec la parole. Cependant, il sera parfois fait référence aux mimiques faciales. »

2.4.1 Gestes spontanés et gestes imposés

Cette définition semble bien placer le geste comme un vecteur de communication, complémentaire à la parole. Il permet d'étendre cette dernière. De plus, l'extension de ce mécanisme à d'autres mouvements du corps comme les yeux, le nez ou la bouche est cohérente avec une vision incarnée de la cognition dans laquelle tout le corps participe aux mécanismes cognitifs. Notons cependant, que ces études du geste s'intéressaient aux gestes spontanés, réalisés par les personnes dès lors qu'elles parlaient. Ce phénomène de production spontanée d'un geste est généralement inconscient (Goldin-Meadow, 2003). Dans ce travail,

nous envisageons le geste comme une constituante de l'activité pédagogique réalisée. Dès lors, il ne peut plus s'agir de gestes spontanés puisque ces derniers auront été scénarisés au préalable pour accompagner l'activité d'apprentissage. Les études sur lesquelles nous nous appuyons ont donc introduit le geste dans les activités d'apprentissage de cette manière. Néanmoins, il nous semble pertinent de nous appuyer également sur le travail réalisé sur l'étude de gestes spontanés accompagnant la parole. En effet, ce travail a notamment permis une catégorisation des gestes liée à la finalité de ces derniers, que nous utiliserons et que nous détaillerons ultérieurement (McNeill, 1992).

Mais avant de faire cette typologie des gestes, il nous faut envisager les différentes façons d'introduire ce dernier dans une situation d'apprentissage. Nous avons dans la littérature relevé trois types de stratégies mises en œuvre : les gestes produits par l'apprenant lui-même qui peuvent être spontanés ou suggérés, les gestes produits par une personne et observés par l'apprenant et enfin les gestes produits par une métaphore humaine (main numérique par exemple) et observés par l'apprenant (Goldin-Meadow, 2014 ; Koning & Tabbers, 2011). Nous allons donc détailler maintenant ces trois types de stratégies.

2.4.2 Le geste produit par l'apprenant

Pouw, de Nooijer, van Gog, Zwaan, et Paas (2014) avancent l'idée que les gestes produits par une personne peuvent être considérés comme des outils cognitifs externes qui remplacent ou soutiennent des activités cognitives. Cela corrobore la thèse de Pass et Sweller (2011) sur la baisse de charge cognitive associée à la production de gestes pertinents pour la tâche d'apprentissage. Pouw et al. (2014) expliquent que par exemple, quand on empêche un orateur d'utiliser les gestes et que son discours porte sur des notions spatiales, le discours de ce dernier est moins fluide comme si l'accès au registre lexical correspondant était rendu plus difficile. De plus, ces auteurs rapportent que l'utilisation de gestes aide essentiellement les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales ou une faible capacité de leur mémoire de travail.

Il semble de plus qu'il y ait un lien entre la nature des gestes produits, l'action cognitive effectuée et la difficulté de cette dernière. Chu et Kita (2011) ont montré que, lors d'une tâche de rotation mentale, les participants utilisaient spontanément plus de gestes lorsque la difficulté de la tâche augmentait. La production de gestes permettait donc aux participants d'externaliser la tâche spatiale demandée ce qui faciliterait cette dernière. Il est intéressant de noter que cette aide du geste de rotation sur la rotation mentale a été également mise en évidence avec des participants devant faire tourner un objet réel (un joystick) lors de

la réalisation de rotations mentales (Wexler, Kosslyn, & Berthoz 1998). Ces auteurs ont de plus montré qu'il fallait que l'action motrice effectuée n'ait pas une signification incompatible avec la tâche mentale exécutée (rotation du joystick dans le sens contraire de la rotation mentale par exemple). Nous verrons dans notre première expérience si nous pouvons utiliser un geste de rotation Multitouch pour favoriser ce type de tâche.

2.4.3 Le geste observé par l'apprenant.

Nous avons jusqu'à présent parlé de la production de gestes par la personne réalisant l'activité cognitive. Cependant, il est aussi possible d'observer un effet de la cognition incarnée lié au contenu éducatif proposé si celui-ci contient par exemple des gestes. Dans une expérience portant sur l'apprentissage de l'effet Doppler, Fiorella et Mayer (2016) ont cherché à évaluer les bénéfices de gestes de dessins réalisés par l'enseignant. Cet apprentissage était réalisé à partir d'une capsule vidéo où le commentaire oral de l'enseignant était accompagné de dessins destinés à comprendre le principe de l'effet doppler. Ces dessins étaient soit présentés tels quels, soit construits dynamiquement au cours des explications. Pour ces constructions dynamiques de dessins, il était possible de voir intégralement le professeur en train de dessiner, de voir seulement sa main ou de voir seulement les dessins apparaître dynamiquement. De meilleurs scores dans des activités de transfert ont été obtenus, pour les participants ayant eu une construction dynamique des dessins mais avec présence d'une partie du corps de l'enseignant (l'enseignant vu de dos ou seulement sa main). Cette fois, il semble donc que les gestes observés aient permis une meilleure compréhension d'un phénomène physique par le fait de visualiser des représentations du phénomène étudié. Il est difficile d'avoir ici un avis sur le caractère signifiant du geste mais il est possible que la personne qui dessine trace plus rapidement une sinusoïde quand la fréquence du signal sonore augmente. Dans tous les cas, cela ne permet pas d'expliquer pourquoi le fait de voir une partie du corps permet un meilleur transfert que le même dessin tracé sans partie du corps visible.

Là encore, dans les gestes observés, on constate un bénéfice des gestes pour les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales (Brucker, Ehlis, Häußinger, Fallgatter, & Gerjets, 2015). Dans cette expérience l'objectif était de comprendre le mouvement réalisé par des poissons lors de déplacements. En plus des animations montrant ces mouvements, les apprenants ont pu observer des personnes simulant les mouvements des poissons en faisant des gestes. Certains gestes reproduisaient le mouvement réel des poissons et certains gestes étaient incompatibles avec ce mouvement. Les personnes ayant des faibles habiletés visuo-

spatiales ne tiraient bénéfice des gestes que dans le cas de gestes compatibles contrairement aux personnes ayant de fortes habiletés visuo-spatiales.

On peut donc maintenant se poser la question de l'efficacité de la production de gestes par rapport à l'observation de gestes. Il semble bien que les gestes produits soient plus efficaces pour l'apprentissage que les mêmes gestes observés. Ce phénomène a été mis en évidence par Cherdieu, Palombi, Gerber, Troccaz et Rochet-Capellan (2017) dans une situation d'apprentissage portant sur l'étude d'un mouvement de rotation de l'avant-bras. Cette prédominance de la réalisation du geste sur l'observation de ce dernier a également été mise en évidence, dans une tâche nécessitant la mise en œuvre de rotations mentales d'objets pour reconstituer une forme donnée (Goldin-Meadow et al., 2012). Ces deux études seront détaillées un peu plus loin dans la partie consistant à analyser le type de gestes produits en fonction de l'objectif d'apprentissage.

Enfin, il semble que les gestes produits durant l'apprentissage permettent un meilleur ancrage des connaissances, en mémoire à long terme, que les gestes observés. Des effets bénéfiques des gestes produits sur des tâches de rappel, après plusieurs jours, ont été observés. (Cherdieu et al., 2017 ; Cook, Mitchell, & Goldin-Meadow, 2008).

A la vue des bénéfices des gestes produits sur les gestes observés, nous n'avons donc utilisé dans nos expériences que des gestes produits par les apprenants. Dans notre deuxième expérience par exemple, nous avons fait réaliser des dessins comme l'ont fait Fiorella et Mayer (2016). Les apprenants ont donc dessiné avec les doigts sur une tablette tactile. L'objectif était de savoir si cette action pouvait améliorer la compréhension des trajectoires de projectiles.

2.4.4 L'ajout d'une métaphore humaine

De Koning et Tabbers (2011) proposent, en plus des gestes, une stratégie supplémentaire pour faciliter la compréhension de phénomènes dynamiques non humains : ajouter une métaphore humaine comme par exemple remplacer des engrenages par des têtes humaines pour aider à se projeter et mieux comprendre le mécanisme. Ils ont mis en œuvre avec succès cette stratégie pour aider l'utilisateur à comprendre le mouvement des éclaircs en ajoutant sur une animation une main décrivant le mouvement de formation de ces derniers (de Koning & Tabbers, 2013). L'ajout d'une métaphore humaine semble aider à résoudre la difficulté liée au caractère transitoire des animations. Cela a été vérifié dans le cas d'animations mettant en jeu des mouvements humains (origami, sports..) car dans ce cas le système miroir serait impliqué : les mêmes circuits corticaux sont activés lors de l'observation

et de la réalisation d'un mouvement (Gog, Paas, Marcus, Ayres, & Sweller, 2009). Il sera donc intéressant d'utiliser en plus des gestes sur une interface Multitouch, des simulations mettant en jeu des mouvements humains, ce que nous avons fait dans notre troisième expérience mais également des animations ne mettant pas en jeu de tels mouvements comme dans notre deuxième expérience.

Nous venons donc de voir que différents types de stratégies, qui impliquent l'utilisation de gestes adaptés ou signifiants, mais également d'actions motrices sur des objets, pouvaient induire de meilleurs apprentissages dans l'utilisation d'animations ou de simulations quand :

- Les utilisateurs ont de faibles habiletés visuo-spatiales ou capacité en mémoire de travail.
- Les contenus à apprendre découlent de mouvements humains (connaissances procédurales) ou alors que les phénomènes étudiés sont présentés en introduisant des mouvements humains.

Dans la partie suivante nous allons essayer de déterminer quels types de gestes sont utiles pour l'apprentissage et dans quels domaines d'apprentissage.

2.5 Nature des gestes produits en fonction du domaine d'étude.

2.5.1 Typologie des gestes produits

Une typologie des gestes régulièrement convoquée dans les études sur les gestes est celle de McNeill (Goldin-Meadow & Beilock, 2010 ; Huang & Mutlu, 2013 ; McNeill, 1992). En analysant les différents gestes qui accompagnent spontanément le discours oral, on peut établir quatre types de gestes :

- Le geste iconique : McNeill (1992, p.78, notre traduction) définit un geste iconique comme un geste qui entretient une relation formelle étroite avec le contenu sémantique du discours. Par exemple, il est possible d'imager le remplissage d'une tasse de thé avec deux mains, une servant de récipient et l'autre mimant le déplacement de la théière. Mais un tel geste peut aussi décrire une idée, comme par exemple, exprimer le retour en arrière ou le passé avec un mouvement de bras derrière son épaule.
- Le geste métaphorique sert cette fois à imaginer un concept abstrait. Il ne sert pas à décrire l'objet ou l'action elle-même mais le but de l'action ou son résultat. Un exemple de geste métaphorique sera par exemple le passage d'une valeur

du terme de droite au terme de gauche lors de la résolution d'une équation mathématique (Goldin-Meadow & Beilock, 2010)

- Le geste déictique est un geste de pointage réalisé souvent en pointant avec son index en direction d'un objet ou dans une direction vague de l'espace. Il est souvent utilisé pour capter l'attention. Il n'est pas forcément pourvu de sens comme le geste iconique. Pour Alibali et Nathan (2012) ce type de geste permet de lier l'environnement physique et le discours. En ce sens, il ancre la cognition dans l'environnement physique.
- Le geste de battement est un geste bref qui sert à rythmer le discours.

Mis à part le geste de battement qui est très spécifique à la linguistique et que nous n'utiliserons donc pas, les trois autres types de gestes peuvent être utilisés.

Concernant plus particulièrement les gestes iconiques, une catégorisation supplémentaire, liée au point de vue de l'auteur qui réalise le geste, existe. L'auteur du geste peut se placer à la place de l'objet ou de la personne (*character viewpoint*) ou se placer en observateur (*observer viewpoint*) (Goldin-Meadow & Beilock, 2010 ; Parrill, 2010). Reprenons l'exemple précédent de la théière et de la tasse de thé. Dans une perspective incarnée de la cognition, il sera évoqué une simulation de la situation dans laquelle l'action motrice participe tout autant que l'imagerie mentale (Parrill, 2010). Dans le cas d'un geste de type *character viewpoint*, la simulation correspondra à un point de vue égocentré alors que le geste de type *observer viewpoint* correspondra à une simulation allocentrée (centrée sur un point de vue externe).

Goldin-Meadow et Beilock (2010) établissent une hiérarchie dans ces différents types de gestes. Les gestes qui ont trait à la cinématique pure du mouvement sont souvent iconiques et réalisés à la première personne. Ils reflètent une action motrice de bas niveau qui se contente de décrire le mouvement simulé de l'objet. Les gestes qui servent à caractériser les objets et leur rôle dans la situation sont, par contre, souvent des gestes iconiques réalisés avec un point de vue externe. Ils reflètent une action motrice de plus haut niveau que les précédents dans le sens où le geste révèle le rôle de l'objet dans la scène.

Enfin, les gestes métaphoriques servent à décrire des processus de plus haut niveau comme des concepts par exemple. On voit donc apparaître deux types de gestes : les gestes servant à décrire un mouvement sont plutôt iconiques et ceux permettant de décrire un concept ou de résoudre un problème sont plutôt métaphoriques. Dans nos études, nous avons utilisé différents types de gestes et nous les avons classés en gestes iconiques ou

métaphoriques selon la nature ou le rôle du processus qu'ils décrivaient. Une question s'est posée à nous concernant les gestes de pointage de mouvements utilisés dans notre dernière expérience. En effet, cette classification peut différer selon que l'on considère que le rôle de ce type de geste est de focaliser l'attention sur un mouvement ou de comprendre un mouvement ou un concept. Dans le premier cas, il pourra être considéré comme déictique et dans le second cas, iconique ou métaphorique, selon la nature de l'objet suivi. Bien que notre étude s'intéresse également à l'effet du geste sur l'attention, nous avons choisi dans le cas des gestes de suivi de mouvement de parler de geste iconique ou métaphorique. En effet, ces gestes étaient également porteurs de sens pour la connaissance à acquérir.

Dans le domaine qui concerne ce travail, à savoir le domaine de l'apprentissage multimédia à base de gestes, une analyse a été réalisée par Sheu et Chen (2014). L'objectif de cette étude était de faire un état sur l'évolution de la recherche concernant les effets des gestes sur l'apprentissage, dans des environnements informatisés. Cette étude portant sur les articles publiés entre 2011 et 2013 cherchait à déterminer l'évolution du nombre d'articles publiés, les matières et domaines d'apprentissage concernés mais aussi le type d'outil numérique mis en œuvre pour produire les gestes. L'étude a retenu 59 articles publiés sur cette période. Détaillons maintenant les différents résultats obtenus.

Concernant l'évolution du nombre d'articles publiés, 54 articles sur 59 ont été publiés entre 2010 et 2013. Sans surprise, les articles sont concomitants avec l'apparition des technologies utilisées et surtout, avec la mise à disposition de cette technologie pour le grand public. On note que la majorité des études (26/59) utilise la Nintendo Wii pour la production de gestes. Cette console de jeu a été mise sur le marché et rendu accessible au grand public dès 2006. La Microsoft Kinect, permettant elle aussi de piloter l'application avec des mouvements et qui a été commercialisée en 2010 est utilisée dans 9 études. Les smartphones et tablettes utilisant la technologie Multitouch qui nous intéresse dans ce travail ont été utilisés dans 4 études. Quelques études ont également été réalisées avec des technologies moins répandues ou développées pour l'occasion : des interfaces tangibles par exemple.

Deux grands domaines se dégagent dans ces études : le domaine de l'apprentissage spécialisé (42 % des articles) (handicap physique, autisme...) et le domaine des sciences (24 % des articles). Concernant le premier domaine, les apprentissages étaient plutôt procéduraux, visant à développer des habiletés motrices et concernaient des adultes comme des enfants. Les articles visant à développer des compétences conceptuelles en sciences (Mathématiques, Physique, Chimie) concernaient, par contre, des enfants en école primaire.

La majorité des articles liés à l'apprentissage spécialisé concernaient donc des apprentissages procéduraux. L'impact des gestes sur ce type d'apprentissage est peu surprenant car la nature même de l'apprentissage visé est basée sur le mouvement. Cela nous ramène à la question déjà évoquée précédemment sur la cognition incarnée et qui est à la base de ce travail : les mouvements du corps et donc les gestes sont-ils également utiles pour des apprentissages conceptuels ?

Concernant les apprentissages conceptuels deux cas rentrent alors en jeu : si le concept à étudier est en rapport avec un mouvement, un geste iconique avec point de vue extérieur sera probablement préférable au vu de ce que nous venons de dire. Par contre, pour appréhender un concept abstrait, un geste métaphorique sera sûrement préférable. Cependant, si l'objet de l'étude peut être modélisé par un geste des mains, des gestes iconiques auront également toute leur place pour appréhender le concept comme nous le verrons plus loin en mathématiques. Par exemple, il sera possible de représenter un triangle avec ses mains, geste iconique, pour décrire le concept d'angles dans un triangle. Voyons donc maintenant, plus en détails, quelques études portant sur ces deux types d'apprentissage conceptuels.

2.5.2 Le geste pour appréhender un concept lié à un mouvement

Cette idée de geste iconique pour appréhender un concept lié à un mouvement a été testée avec succès dans plusieurs études. Nous allons en décrire deux : la première, car elle pointe bien l'effet du geste iconique pour ce type d'apprentissage et la seconde, car c'est une des rares études à porter sur des adultes.

Commençons par évoquer l'étude de Goldin-Meadow et al. (2012) portant sur une tâche de rotation mentale. Il s'agissait dans cette étude, pour de jeunes enfants, de choisir deux objets pouvant être assemblés pour réaliser une forme proposée. Cette tâche était réalisée en pré-test et post-test. Entre les deux, une phase d'entraînement était proposée avec quatre situations expérimentales visant à tester l'effet de la nature du geste et l'effet de la réalisation. Pour la nature du geste, un expérimentateur réalisait soit des gestes iconiques de mouvement de rotation au-dessus de deux pièces permettant d'arriver au résultat, soit de simples gestes de pointage vers les pièces à choisir. Pour chaque type de geste, un groupe devait simplement observer le geste et un autre groupe devait le reproduire. Les résultats montrent que seul le geste iconique utilisé dans la phase d'entraînement amène à un meilleur apprentissage et donc à un meilleur score au post-test. De plus, comme déjà évoqué, les gestes réalisés sont plus efficaces que ceux observés. Le geste de pointage durant la phase d'entraînement a été inefficace pour l'apprentissage, qu'il soit réalisé ou observé.

Citons également une autre étude intéressante qui portait cette fois sur des personnes adultes (Cherdiou et al., 2017). Il s'agissait ici de comprendre le fonctionnement du corps humain dans les processus de pronation (rotation interne) et supination (rotation externe) de l'avant-bras. Une vidéo était proposée aux participants. Elle contenait des dessins anatomiques avec des termes de vocabulaire à retenir ainsi que des explications sur les rôles et mouvements respectifs des ligaments et des os, dans les processus de supination et de pronation. Dans cette vidéo, une personne réalisant des gestes essentiellement iconiques était visible. Les participants d'un groupe devaient regarder ces gestes alors que ceux d'un deuxième groupe devaient en plus les reproduire. Comme dans les études précédentes, de meilleurs résultats d'apprentissage ont été obtenus par le groupe ayant réalisé les gestes. Ce phénomène était notamment plus marqué sur les rappels à long-terme des connaissances.

2.5.3 Le geste pour appréhender une connaissance abstraite

Dans cette partie, nous allons nous intéresser à des gestes permettant de faciliter l'assimilation d'un concept ou aidant à résoudre un problème. De nombreux résultats ayant été obtenus dans le domaine des mathématiques, commençons par ce domaine spatial d'étude. Le premier exemple concerne le concept de notion de cardinalité chez les jeunes enfants, à savoir que le chiffre du dernier item compté dans un ensemble, représente la taille de l'ensemble. Gunderson, Spaepen, Gibson, Goldin-Meadow et Levine (2015) ont montré que l'utilisation de doigts pour représenter la cardinalité d'un ensemble était dû au fait que les enfants n'arrivaient pas à exprimer cette notion. L'utilisation d'un geste, iconique ici, ne permet donc pas de comprendre le concept mais vient, chez les jeunes enfants, en soutien du langage, pour exprimer ce concept.

Toujours dans le domaine des mathématiques, Broaders, Cook, Mitchell et Goldin-Meadow (2007) ont montré que l'utilisation de gestes permettait de mieux résoudre un problème. Un deuxième effet a été observé : le développement du répertoire des stratégies pour résoudre ce problème. Dans un problème de résolution d'une équation du premier degré, les auteurs ont demandé à des élèves d'expliquer à l'oral leur façon de résoudre le problème. Certains devaient utiliser des gestes durant leurs explications et d'autres non. Des gestes métaphoriques ont été utilisés comme par exemple mettre les doigts en V pour expliquer que les termes devaient être groupés deux par deux, ou faire passer la paume de la main sous le côté gauche de l'équation puis sous le côté droit pour expliquer que les sommes des deux côtés de l'équation devaient être identiques. Le fait d'utiliser les gestes a permis de meilleurs résultats au post-test sur le même type de problème. De plus, les élèves qui avaient enrichi

leur répertoire de stratégies durant les phases d'explication sont ceux qui ont le plus progressé.

Enfin, toujours dans le domaine des mathématiques, en faisant travailler les élèves sur les longueurs des côtés d'un triangle, Walkington et al. (2014) ont montré une efficacité supérieure de l'utilisation de gestes dynamiques par rapport à l'utilisation de gestes statiques. Un geste dynamique était par exemple de former un triangle avec ses mains et de le déformer pour faire varier les angles de ce dernier.

L'utilisation de gestes a également montré son efficacité dans des domaines non spatiaux comme dans le raisonnement moral, c'est-à-dire réfléchir à des idées comme la peine de mort, la légalisation des armes à feu, le mariage pour tous... Là encore le fait de produire des gestes a permis aux enfants d'enrichir la prise de recul sur ces questions (Beaudoin-Ryan & Goldin-Meadow, 2014).

Nous devons cependant faire une première constatation concernant ces différentes études. Elles concernent l'utilisation du geste en complément de la parole et quasi exclusivement chez des jeunes enfants. De même, les 14 études sur les 59 relevées par Sheu et Chen (2014) utilisant les gestes dans un environnement numérique concernaient des enfants de l'école primaire. Notons également, que seulement deux études sur les 59, utilisaient une tablette pour la production de gestes. La majorité de ces études utilisait des dispositifs comme la Wii de Nintendo, la Kinect de Microsoft mais également des interfaces haptiques ou des environnements de réalité virtuelle permettant une mobilisation plus importante du corps dans l'activité. Un défi de ce travail, est donc de voir, s'il est possible d'obtenir également un bénéfice du geste seul, dans un environnement multimédia simple, avec un public d'adolescents ou de jeunes adultes.

Après avoir vu les différentes manières d'introduire un geste dans une situation d'apprentissage et fait le tour des différents types de gestes susceptibles d'être utilisés en fonction de l'objectif d'étude, il reste une question cruciale à traiter : si les gestes ont une influence sur l'apprentissage, sur quels processus cognitifs peuvent-ils agir et comment ? Répondre à cette question permettrait de dépasser la seule conclusion d'une variation de charge cognitive et ouvrirait des perspectives, pour l'élaboration d'activités adaptées aux tablettes et favorisant l'apprentissage. Nous tentons d'apporter des éléments de réponse à cette question dans le chapitre suivant.

2.6 Multitouch, gestes et cognition incarnée : quel lien avec la mémoire de travail ?

Comme explications aux bénéfices des gestes sur l'apprentissage mettant en jeu des contenus dynamiques (vidéo, animations ou simulations), Castro-Alonso, Ayres et Paas (2015) proposent trois pistes :

- Les gestes activeraient « les mécanismes incarnés » ce qui permettrait de relier les concepts abstraits à l'environnement physique réel.
- Les animations montrant des gestes capteraient mieux l'attention des apprenants que celles n'en présentant pas.
- Les gestes fourniraient un canal informationnel supplémentaire, simultané au canal verbal utilisé dans la parole, transmettant ainsi des données supplémentaires à l'apprenant. Le geste est donc, ici, vu comme une nouvelle modalité d'encodage de l'information qui permettrait d'enrichir les représentations. Si tel était le cas, il pourrait de plus y avoir un effet de redondance néfaste comme cela a été montré avec les modalités visuelles et auditives, par exemple.

Il semble assez difficile à ce stade de détailler les mécanismes incarnés, évoqués. Par contre, les deux derniers points évoquant l'influence des gestes sur les processus attentionnels ou considérant le geste comme une modalité d'encodage d'informations peuvent être mis en relation avec le fonctionnement de la mémoire de travail, lors d'activités cognitives. Nous allons dans la prochaine partie, faire un état des lieux des modèles concernant la mémoire, pour voir lesquels semblent le plus compatibles avec ces deux affirmations. En effet, si un effet de l'interaction gestuelle Multitouch est mis en évidence dans les tâches d'apprentissage, en comprendre la cause nécessitera, sans aucun doute, d'analyser les processus qui se déroulent en mémoire de travail.

2.6.1 Les différents types de mémoire.

Il existe diverses catégorisations concernant la mémoire selon la durée, la nature des informations stockées et les disciplines traitant du sujet de la mémorisation humaine (psychologie cognitive, neurosciences). Concernant la durée du maintien des informations en mémoire, on distingue principalement deux types de mémoire, appelés mémoire à long terme et mémoire à court terme. La majorité des modèles utilise cette distinction mais certains modèles comme le modèle de Cowan (1988) n'envisagent eux qu'un seul type de mémoire. Cette démarche peut sembler cohérente avec le fait que, de l'encodage initial d'une

information à sa transformation en une trace mnésique durable dans la « mémoire à long terme », les mêmes aires corticales seront mises en jeu (Bauer & Varga, 2016).

Dans les considérations précédentes concernant la mémoire nous n'avons envisagé que le stockage en mémoire d'informations. Cependant, il semble difficile d'envisager la cognition sans un traitement actif de ces dernières. Baddeley et Hitch (1974) vont donc populariser le concept de mémoire de travail, mémoire permettant un traitement actif des informations stockées et manipulées. Ces auteurs utilisent la distinction entre mémoire à long terme et mémoire à court terme et appellent mémoire de travail le système de traitement des informations en mémoire à court terme. Cette vision modulaire de la mémoire n'est pas partagée par tous les chercheurs et le lecteur cherchant une description détaillée des différentes approches de la mémoire de travail pourra se référer à la synthèse de Barrouillet et Camos (2007).

Le modèle de Baddeley et Hitch (1974) pose les fondements du modèle de l'apprentissage multimédia proposé ensuite par Mayer (2005). Nous allons maintenant décrire ces deux modèles en essayant de comprendre quel rôle le geste pourrait y jouer.

2.6.2 Place du geste dans le modèle de Baddeley et Hitch

Dans la dernière révision de ce modèle, (Baddeley, 2000), la mémoire de travail est composée de trois sous parties capables de stocker des informations selon la nature de ces dernières :

- La boucle phonologique pour des informations verbales ou auditives.
- Le calepin visuospatial pour des informations visuelles.
- Le *buffer* épisodique capable de faire le lien entre les informations stockées en mémoire à long terme et les informations provenant des deux autres unités de stockage.

Le fonctionnement cohérent entre ces différents sous-systèmes est réalisé par des mécanismes attentionnels, regroupés par les auteurs sous le terme d'administrateur central. (cf. Figure 1)

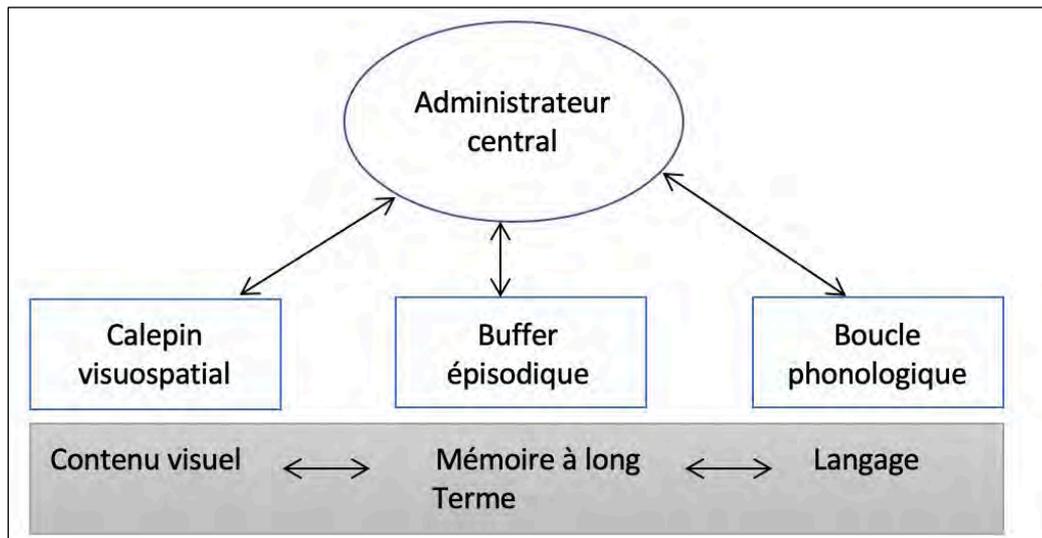


Figure 1 : Modèle de la mémoire de travail, tiré de Baddeley (2000)

Dans son modèle de l'apprentissage Multimédia, Richard Mayer (2005) englobe cette architecture de mémoire de travail dans une vision plus large de la mémoire pour expliquer le fonctionnement cognitif, lors du traitement d'informations multimédias. (cf. Figure2)

Dans ce modèle, trois mémoires différentes sont évoquées. Lors de la consultation d'un document multimédia, la mémoire sensorielle entre en premier en jeu pour un temps très court pour acquérir l'information visuelle et auditive. L'organisation de l'information en mémoire de travail commence par la construction de deux modèles distincts : le modèle verbal et le modèle pictural. Ils sont construits en manipulant les représentations verbales et auditives des informations issues de la mémoire sensorielle. Il faut noter que dans ce modèle, le passage d'une modalité à l'autre est permis : par exemple, entendre le mot chat peut s'accompagner de la création d'une image mentale visuelle représentant un chat. Enfin, le modèle verbal et pictural créé est mis en relation avec les connaissances antérieures de l'apprenant, issues de la mémoire à long terme, afin d'élaborer un nouveau modèle mental de la connaissance étudiée. Cette connaissance sera ensuite stockée en mémoire à long-terme.

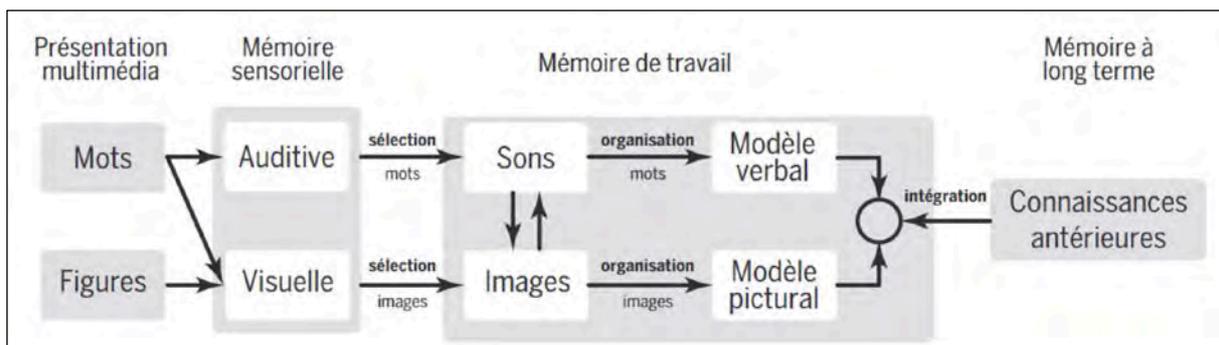


Figure 2 : théorie cognitive de l'apprentissage multimédia, tirée de Mayer (2005).

La première constatation que nous pouvons faire est que ces deux modèles, dès la mémoire sensorielle, ignorent le sens kinesthésique. Dès lors il est normal qu'aucune architecture n'existe dans la mémoire de travail pour stocker des informations provenant de ce sens. L'antériorité de ces modèles par rapport à l'attrait des activités motrices durant l'apprentissage explique sûrement cette absence. En envisageant une utilisation non tactile des ressources multimédia, on peut en effet comprendre qu'un capteur comme la peau humaine, aussi sensible qu'il soit, ne semble pas être un bon candidat, pour produire une source d'information pertinente dans les activités cognitives. Maintenant, avec l'avènement du Multitouch et si on considère comme cela a été évoqué précédemment le geste comme une constituante de l'activité cognitive, il semble nécessaire de faire évoluer ce type de modèle. Concernant le modèle de Baddeley (2000) on peut envisager selon la fonction que l'on donne au geste dans l'activité d'apprentissage :

- D'inclure un nouveau sous-système de stockage d'informations si le geste est considéré comme une modalité d'encodage qui vient soutenir le canal verbal comme cela semble être envisagé dans la plupart des travaux présentés précédemment.
- D'étendre les fonctions assignées à l'administrateur central si l'on considère seulement les effets des gestes comme relevant de purs mécanismes attentionnels.

Le modèle de Baddeley et Hitch détaille cependant peu le fonctionnement de l'administrateur central et pour essayer d'envisager le geste comme un modérateur de l'attention de l'apprenant il nous semble préférable d'explorer d'autres modèles de fonctionnement de la mémoire.

Afin de voir, si l'activité gestuelle peut être un modulateur des mécanismes attentionnels, nous allons dans les deux parties suivantes nous intéresser au rôle des processus attentionnels, dans le fonctionnement de la mémoire de travail et introduire notamment la notion de goulet d'étranglement.

2.6.3 Mémoire de travail et attention

L'attention joue donc un rôle clé dans le fonctionnement de la mémoire de travail comme en atteste la définition donnée par François Maquestiaux (2013) :

« Cet espace permet la réalisation de deux activités en interaction permanente : le maintien actif et le traitement des informations dont les individus ont besoin lorsqu'ils pensent, réfléchissent, agissent... L'activité de maintien implique de contrôler le contenu des

informations présentes à l'esprit, notamment en bloquant l'accès aux informations non pertinentes au regard du but de la tâche en cours (résistance à la distraction). »

Nous voyons à travers cette définition, à quel point, la régulation entre les activités mnésiques de maintien des informations et les activités de traitement en mémoire de travail est sous le contrôle de l'attention. D'ailleurs, pour Engle (2002, p.20, notre traduction), la capacité en mémoire de travail n'est pas reliée au nombre d'éléments pouvant être stockés ou manipulés (tels que mesurés dans les tâches classiques d'empan) mais plutôt dans la faculté à contrôler son attention : « Cependant, j'ai l'impression que la capacité de mémoire de travail ne concerne pas les différences individuelles dans le nombre d'éléments qui peuvent être stockés en soi, mais plutôt les différences dans la capacité de contrôler l'attention pour maintenir l'information dans un état actif et rapidement récupérable ».

Pour d'autres auteurs comme McCabe, Roediger, McDaniel, Balota et Hambrick (2010), les mesures de la capacité en mémoire de travail et les mesures de fonctionnement exécutif mesurent en fait une grandeur commune qu'ils appellent « attention exécutive ».

De plus, dans les tâches scolaires, mémoire de travail et fonctions exécutives sont fortement mobilisées. Ces capacités se développent avec l'âge, jusqu'à l'âge adulte, avec une implication de plus en plus importante des régions frontales du cerveau corrélée à une baisse d'activation dans d'autres zones, au profit d'une meilleure efficacité du traitement cognitif (Eustache & Guillery-Girard, 2016)

Pour terminer cette partie, citons De Ribaupierre (2016, p.180) qui évoque la mémoire de travail : « Il ne s'agit pas tant d'une variable mnésique que d'une compétence attentionnelle. La MdT ne constitue sans doute pas un système spécifique, ou une « aptitude » ou « compétence ». Il semble préférable de parler de tâches de mémoire de travail qui font appel à un certain nombre de processus de nature attentionnelle, processus qui sont certainement aussi à l'œuvre dans d'autres tâches. »

Dès lors, nous pouvons penser que la dimension attentionnelle présente un intérêt majeur dans les processus d'apprentissage, liés au geste. En effet, pour des tâches scolaires mettant en jeu des individus dont la maturation du cortex préfrontal n'est pas forcément atteinte, toute action devrait être envisagée dans le but de focaliser l'attention sur la tâche de traitement à effectuer.

Du fait de leur interaction directe sur le matériel d'étude, il semble donc intéressant de se demander s'il est possible de focaliser l'attention sur la tâche de traitement, en utilisant le geste ? Mais aussi quel(s) type(s) de geste(s) envisager dans le cas où le matériel d'étude est

dynamique comme dans le cadre d'une animation ? Pour essayer de répondre à ces questions nous détaillerons dans la partie suivante les notions de focus attentionnel et de goulet d'étranglement utilisées pour décrire le fonctionnement de la mémoire de travail.

2.6.4 Fonctionnement de la mémoire de travail : goulet d'étranglement et focus attentionnel

La vision modulaire de la mémoire présentée par Baddeley et Hitch ne fait pas l'unanimité. Des chercheurs comme Cowan sont partisans d'une conception unitaire de la mémoire. Cowan voit dans le concept de mémoire de travail, la partie « activée » de la mémoire à long-terme (Cowan, 1988). Il introduit la notion de focus attentionnel. Le goulet d'étranglement a, lui, été introduit par Barrouillet, Bernardin et Camos (2004) dans leur modèle « *Time-Base Resource Share (TBRS)* ». Nous allons voir à travers la description de ces deux modèles comment ces deux notions assurent la cohérence du fonctionnement de la mémoire de travail basé sur l'existence d'un seul faisceau de ressources (contrairement au modèle Baddeley avec le calepin visuospatial et la boucle phonologique d'une part et l'administrateur central d'autre part).

Cowan (1988, 2005) propose une vision unitaire de la mémoire comme nous l'avons dit précédemment. Bien que, contrairement à Baddeley, il postule lui aussi l'existence d'un seul canal de ressources attentionnelles, il ne semble pas, par contre, remettre en cause les interférences entre les stimuli de même forme verbale ou visuospatiale. Il préconise seulement un modèle plus large et donc volontairement plus vague où l'ensemble des stimuli (même les tactiles) activent une zone de la mémoire à long terme. Pour Cowan, la mémoire de travail ne serait que la partie « activée » de la mémoire à long terme. Dans cette zone de la mémoire, certaines zones seraient activées de manière automatique alors que d'autres nécessiteraient un apport attentionnel pour être activées par l'exécuteur central. En ce sens, il partage avec Baddeley la notion d'exécuteur central en charge d'orienter l'attention sur les processus de sélection, de maintien et de stockage des informations. Le terme de focus attentionnel est utilisé pour décrire le fait que l'attention permet de porter à la conscience ces informations stockées en mémoire de travail (cf. Figure 3).

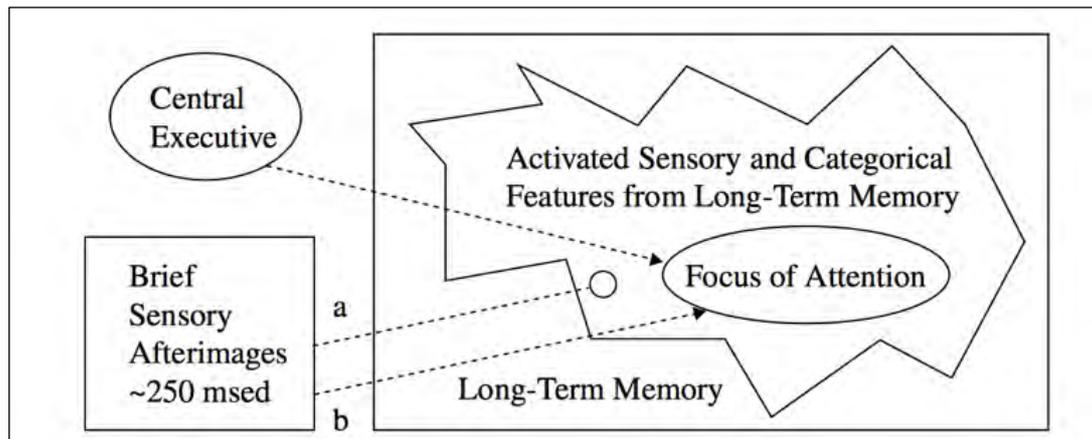


Figure 3 : Représentation du modèle de Cowan (tiré de *Working Memory Capacity*, Cowan, 2005)

Enfin, ce focus attentionnel pourra être large ou précis, selon la nature du processus mis en œuvre. L'attention, lors d'un traitement d'information, sera focalisée sur un point particulier correspondant à un focus précis, alors que par exemple sur des tâches de maintien en mémoire, le focus attentionnel pourra être élargi sur une zone plus large de la mémoire activée, permettant le maintien de plus d'informations. Pour lui, cependant, un traitement peut être automatisé par l'habitude et activer automatiquement une zone de la mémoire à long terme sans passer sous le contrôle du focus attentionnel.

Le modèle TBRS (modèle de partage temporel des ressources) est également un modèle unitaire de la mémoire de travail. Il postule l'existence d'un goulet d'étranglement central : l'attention en mémoire de travail doit sans cesse se partager entre les données à retenir et les données à manipuler. Dans ce modèle, durant l'activité de traitement des informations, le maintien en mémoire des informations diminue. Plus la tâche de traitement est longue et moins les informations retenues sont nombreuses. Une fois la tâche de traitement terminée, l'attention est redirigée vers l'activité de maintien et réactive les informations en mémoire. Le schéma ci-dessous (cf. Figure 4) illustre ce principe : l'utilisateur devait retenir en mémoire de travail des lettres, ici, en jaune. La tâche de traitement consistait à lire des chiffres.

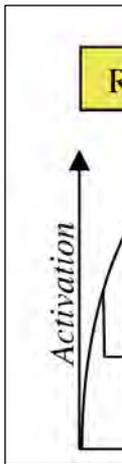


Figure 4 : évolution de la trace mnésique au cours du temps dans le modèle TBRS tiré de Portrat, Camos et Barrouillet (2009)

No

us observons bien le déclin de la trace mémorielle lorsque l'attention est focalisée sur une tâche de traitement d'information (lire des chiffres) et la réactivation de cette dernière entre les tâches de traitement.

Les performances en mémoire de travail seraient donc intimement liées à la faculté d'attention et à l'efficacité de ce mécanisme de « switch attentionnel » entre les activités de maintien en mémoire et de traitement (Barrouillet, Bernardin, & Camos, 2004 ; Camos & Barrouillet, 2014). Les auteurs ont constaté que l'efficacité de ce mécanisme dépendait bien de l'âge des personnes testées : ce mécanisme semble moins efficient chez les jeunes enfants. Cependant dès 14 ans, les performances en mémoire de travail deviennent similaires à celles de jeunes adultes.

L'originalité de ce modèle provient du fait que ce n'est pas la difficulté de la tâche qui limite les performances en mémoire de travail mais bien la durée de réalisation de cette dernière. Barrouillet, Bernardin, Portrat, Vergauwe, et Camos (2007) postulent d'ailleurs que la charge cognitive CL d'une tâche peut être appréhendée par la formule suivante : $CL = \frac{a.N}{T}$ où :

- N est le nombre de phases de traitement d'information
- a est un facteur qui représente la durée pendant laquelle l'attention est capturée par les phases de traitement.
- T est la durée totale de la tâche.

C'est donc bien la durée relative des tâches de traitement par rapport à la durée totale de la tâche qui sera coûteuse et néfaste au rappel des informations stockées en mémoire de travail.

De ces deux approches, celle de Cowan (2005) et celle de Barrouillet et al. (2004), nous pouvons supposer que sera facilitante, pour la réalisation d'une tâche scolaire, toute action :

- Point 1 : qui oriente l'attention vers un point précis nécessitant un traitement cognitif (focus étroit sur un point saillant).
- Point 2 : qui limite la durée de ce traitement (permettant la libération de ressources attentionnelles vers l'activité de maintien en mémoire d'informations).

Il restera donc à déterminer en quoi l'interaction Multitouch peut permettre de réaliser une de ces conditions sans être contraire à la deuxième. Concernant le point 1 d'orientation de l'attention, nous avons montré que c'était typiquement le rôle des gestes de pointage. Mais l'inconvénient de ce type de gestes est qu'il est dénué de sens. Nous pouvons cependant envisager de focaliser également l'attention de l'apprenant sur une partie d'une animation nécessaire à la compréhension du phénomène étudié. Un geste iconique de suivi d'un mouvement pourra par exemple être utilisé pour cette tâche. Cela permettra de plus d'envisager ce geste comme une aide à la conceptualisation si l'on suppose que ce geste possède les deux rôles déjà évoqués : focaliser l'attention et faciliter l'encodage d'informations. L'utilisation de tels gestes risque cependant d'allonger la durée de traitement d'informations et donc de retarder la libération de ressources attentionnelles utiles pour la rétention d'information. Un juste équilibre sera donc à trouver sur ce point.

Cette partie consacrée aux liens entre les gestes et la cognition aura donc été l'occasion de préciser le cadre théorique utilisé dans ce travail. Nous avons détaillé le paradigme de cognition incarnée radicale et expliqué que cette approche, visant à bâtir un modèle de la cognition dénué de représentations ne nous semblait pas adapté pour expliquer les apprentissages de type conceptuels. L'approche de ce travail est donc de considérer la cognition incarnée comme la recherche de l'apport pour l'apprentissage d'une action motrice, en l'occurrence le geste, dans la lignée des modèles cognitivistes.

Nous avons également détaillé l'état des connaissances sur la nature du geste et son effet sur l'apprentissage. Cela nous a permis de décrire une typologie de gestes utilisés dans la production de gestes co-verbaux : en effet l'apport du geste dans l'apprentissage a majoritairement été étudié dans ce domaine. Nous avons de plus constaté que la majorité des résultats obtenus concernaient des apprentissages procéduraux. Pour les apprentissages de type conceptuels, les bénéfices positifs du geste l'ont été surtout avec des jeunes enfants. Enfin, concernant l'utilisation de dispositifs numériques, nous avons vu que majoritairement

les dispositifs utilisés permettaient la production de gestes de grande ampleur comme avec la Nintendo Wii. L'intérêt de ce travail sera donc de rechercher un bénéfice du geste sur des apprentissages conceptuels, chez des adolescents, en utilisant un dispositif permettant une production de gestes d'amplitudes limitées : l'interface Multitouch. Il n'en demeure pas moins que cette interface reste la principale interface d'interaction pour le grand public car elle équipe les smartphones et tablettes du marché.

Nous avons également dans cette partie, détaillé les mécanismes cognitifs susceptibles d'être impliqués en mémoire de travail, lors de la production de gestes, dans une tâche d'apprentissage. Le but de ce travail sera d'essayer de vérifier, si le geste permet d'encoder de l'information supplémentaire via une nouvelle modalité ou si l'effet du geste est purement attentionnel et joue donc un rôle de guidage attentionnel.

Nous avons enfin évoqué dans cette partie que l'influence positive des gestes semblait liée aux habiletés visuo-spatiales des apprenants. Les gestes sembleraient aider les apprenants ayant de faibles habiletés visuo-spatiales. Nous allons donc rapidement évoquer ce point dans la dernière partie de cette revue théorique.

Chapitre 3 : Les habiletés visuo-spatiales dans l'apprentissage

A la vue du lien possible entre l'utilisation bénéfique d'un geste et le niveau d'habiletés visuo-spatiales, nous sommes donc amenés à vérifier si un tel effet est présent dans les différentes expériences réalisées. Dans cette partie, nous allons donc commencer par décrire ce que le terme habiletés visuo-spatiales recouvre. Nos expériences portant sur l'utilisation de simulations en sciences, concernant des phénomènes dynamiques, nous décrirons le rôle joué par les habiletés visuo-spatiales dans l'apprentissage de phénomènes dynamiques. Nous terminerons cette partie en décrivant le lien entre ces habiletés et la réussite dans l'apprentissage des sciences.

3.1 Définition des habiletés visuo-spatiales

Les habiletés visuo-spatiales se décomposent en plusieurs sous-compétences qui sont mises en jeu dans de multiples activités comme ranger au mieux ses valises dans le coffre d'une voiture, se repérer dans l'environnement lors d'activités de navigation, réaliser un puzzle par exemple ou lorsqu'il est nécessaire de changer de point de vue.

De grosses variabilités existent vis-à-vis de ces habiletés entre les différentes personnes. Concernant l'effet du genre, qui semble plus résistant sur quelques habiletés comme la rotation mentale notamment, des différences existent dans les résultats bien que l'origine de cette différence fasse controverse (différence d'aptitude ayant une origine biologique ou simple effet d'un stéréotype social). L'origine de cette différence ne sera pas recherchée dans ce travail mais plutôt comme le suggèrent Newcombe et Stieff (2012), l'objectif sera ici de mettre en place, des activités permettant d'améliorer ces habiletés ou de surmonter les difficultés rencontrées liées à ces habiletés. Nous avons par exemple, dans notre première expérience, cherché un effet bénéfique, d'un geste signifiant (rotation à deux doigts) sur une interface Multitouch, lors de la réalisation d'une tâche spatiale impliquant des rotations d'objets.

De nombreuses typologies concernant ces habiletés visuo-spatiales ont été proposées ce qui ne facilite pas la comparaison des résultats des diverses études menées. Pour remédier à cela, Newcombe et Shipley (2015) proposent quatre catégories d'habiletés spatiales qui permettent de couvrir les nombreuses habiletés visuo-spatiales dans ce domaine (Intrinsèque statique, intrinsèque dynamique, extrinsèque statique et extrinsèque dynamique). Le tableau 1 ci-dessous détaille ces quatre catégories. Nous utiliserons donc cette typologie pour déterminer la nature des habiletés visuo-spatiales mises en jeu dans les activités proposées.

Tableau 1 : classement des habiletés visuo-spatiales selon Newcombe et Shipley (2015)

	Intrinsèque	Extrinsèque
Statique	Coder la configuration spatiale (ou forme) d'objets ; discriminer des formes à partir d'objets superposés ou d'autres informations de la perception ; identifier des régions de l'espace.	Coder la position spatiale d'objets par rapport à un référentiel donné. (Exemple : tâche de perception spatiale)
Dynamique	Transformer le codage spatial des objets (rotation, zoom, déplacement) en 2D ou en 3D. (Exemple : tâche de rotation mentale)	Mettre à jour les relations spatiales inter-objet lors du mouvement d'un objet ou lors du mouvement de l'observateur. (Exemple : Changement de point de vue)

Dans une situation d'apprentissage, il ne s'agira pas seulement de posséder de bonnes habiletés visuo-spatiales mais également en fonction de la situation, de mobiliser la bonne stratégie parmi celles évoquées, pour répondre au mieux à la tâche. Hegarty (2010) définit d'ailleurs l'intelligence spatiale comme une pensée spatiale adaptative. Elle montre que la stratégie mise en œuvre dépend non seulement de l'expertise de la personne dans le domaine mais également de la difficulté de la tâche. Dans un des exemples qu'elle prend, à savoir, étudier le comportement d'une chaîne d'engrenages, il est intéressant de noter que les gestes des utilisateurs montrent comment ils infèrent de nouvelles règles de fonctionnement du mécanisme. Là encore, le geste est au cœur du processus de conceptualisation du fonctionnement du système dynamique.

3.2 Habiletés visuo-spatiales et apprentissage de phénomènes dynamiques

Les habiletés visuo-spatiales sont régulièrement sollicitées dans des activités à l'école. Bien qu'il soit évident, qu'elles le soient fortement dans des activités de géométrie ou de dessin par exemple, nous avons expliqué précédemment qu'un discours pouvait également traiter de contenus spatiaux. De plus, avec l'apparition des animations ou simulations informatiques et les performances de modélisation, la visualisation de phénomènes dynamiques devient plus réaliste. Pour autant, ces animations permettent-elles de mieux

supporter l'apprentissage et si oui, quelle sera l'influence des habiletés visuo-spatiales sur les résultats obtenus ?

La réponse à la première question ne semble pas évidente. Dans bien des cas, l'animation ne permet pas un meilleur apprentissage que la représentation statique du phénomène dynamique. (Betrancourt, Bauer-Morrison, & Tversky, 2001; Betrancourt, 2003; Tversky, Morrison, & Betrancourt, 2002).

Les résultats, par contre, semblent bien dépendants des habiletés visuo-spatiales de l'apprenant. Dans une méta-analyse portant sur 27 expériences dans 19 études, Höffler (2010) a analysé les résultats d'études utilisant toute sorte de visualisations de phénomènes dynamiques (succession d'images statiques, animations interactives ou non interactives, 3D...). Il a relevé globalement de meilleurs résultats d'apprentissage pour les apprenants à fortes habiletés visuo-spatiales. Cependant, il note que cela est surtout vrai pour les successions d'images statiques : en effet, les apprenants à fortes habiletés visuo-spatiales sont capables de construire une représentation cohérente du phénomène dynamique. Pour les apprenants à faibles habiletés visuo-spatiales, par contre, l'animation leur permettrait d'obtenir de meilleurs résultats car elle leur fournit un modèle cohérent du phénomène qu'ils auraient été incapables de construire seuls. Une étude réalisée dans la foulée confirme ces affirmations (Höffler & Leutner, 2011). Dans nos études portant sur des simulations en sciences, il sera donc intéressant de vérifier si l'apport du geste, qui a également montré son intérêt pour les personnes à faibles habiletés visuo-spatiales, permet une meilleure compréhension quand il est couplé à des animations en sciences.

Pour conclure ce rapide point sur les habiletés visuo-spatiales en lien avec des situations d'apprentissage nous allons dire quelques mots spécifiques sur les études portant sur le domaine de la physique et plus particulièrement de la mécanique. En effet, les expériences 2 et 3 traiteront de phénomènes mécaniques.

3.3 Les habiletés visuo-spatiales comme prédicteur de réussite en sciences.

Dans cette partie nous détaillerons les liens existants entre les habiletés visuo-spatiales et la réussite dans les tâches d'apprentissage scientifique, à savoir que de bonnes habiletés visuo-spatiales sont un prédicteur de réussite en sciences mais qu'également la réalisation de tâches scientifiques permet de développer ces habiletés.

Une étude permet de prouver à quel point le niveau d'habiletés visuo-spatiales est un prédicteur de réussite en sciences. Wai, Lubinski et Benbow (2009) ont analysé des résultats

provenant d'une vaste étude menée dans les années 70 aux États-Unis portant sur environ 400 000 adolescents. Ces adolescents ont passé durant une semaine des tests portant sur les connaissances mathématiques et sur les habiletés visuo-spatiales et verbales. Une étude longitudinale sur le devenir de ces étudiants suite à leurs études secondaires a été menée après un an, 5 ans et 11 ans. L'analyse des résultats après 11 ans, montre que plus de 90% des étudiants ayant un niveau de doctorant en sciences se trouvaient adolescents dans le premier quartile concernant les habiletés visuo-spatiales.

Dans le domaine qui nous intéresse plus particulièrement dans nos études, à savoir la mécanique, Vallett (2013) a montré une influence forte des habiletés visuo-spatiales dans la compréhension des concepts de la mécanique newtonienne.

Un autre point important concernant les habiletés visuo-spatiales est le fait que ces dernières ne sont pas figées et sont sensibles à l'entraînement. De plus, différentes modalités d'entraînement peuvent être mises en œuvre pour développer ces habiletés. Martin-Gutierrez et Contero (2012) ont cherché à modéliser l'entraînement de ces habiletés en faisant varier la modalité d'entraînement (jeu vidéo, réalité augmentée) et le support (Pc, Nintendo DS). De leur étude, il ressort que l'entraînement avec un jeu vidéo (Tétris était utilisé dans cette étude) est l'entraînement qui favorise le plus le développement des habiletés visuo-spatiales. Sanchez (2012) a montré qu'un entraînement avec un célèbre jeu vidéo de tir à la première personne (FPS), Halo, favorisait également le développement des habiletés visuo-spatiales. Mais le plus intéressant est qu'il a montré que ces compétences étaient également transférables dans d'autres domaines comme en sciences notamment. Une revue de littérature de Uttal et al. (2013) confirme cette malléabilité des habiletés visuo-spatiales et les effets de transferts dans des tâches n'ayant pas été spécifiquement entraînées. Enfin, un simulateur dans le domaine étudié peut également servir de développement des habiletés visuo-spatiales. Kozhevnikov et Thornton (2006) ont établi un lien entre les habiletés visuo-spatiales et la compréhension des phénomènes newtoniens avant l'utilisation d'un simulateur de physique. Ce dernier a fait de plus augmenter les habiletés visuo-spatiales des élèves et des enseignants et a de ce fait réduit le rôle des habiletés visuo-spatiales en tant que prédicteur de la compréhension des mouvements.

PROBLÉMATIQUE : effet du geste lors d'une interaction Multitouch sur les processus d'apprentissage

Comme expliqué dans le premier chapitre de ce travail, l'objectif de ce travail est d'étudier l'impact de la production de gestes sur l'apprentissage dans un environnement numérique. La tablette a donc naturellement été choisie comme support à la production de ces gestes via son interface Multitouch. Ce mode d'interaction a en effet été rendu accessible au grand public avec le premier iPhone et généralisée depuis sur smartphones et tablettes.

La première caractéristique de l'interaction Multitouch étant la production de gestes, et compte tenu du caractère spatial de ce dernier, nous avons décidé de focaliser nos travaux sur l'apprentissage de phénomènes dynamiques en physique. En effet, ce domaine nécessite la mise en œuvre de compétences spatiales pour bien appréhender les phénomènes mis en jeu. De plus, de nombreuses simulations existent et sont régulièrement utilisées dans les classes dans cette matière. De nombreuses études ont été menées sur l'apport des animations ou simulations, voir Berney et Bétrancourt (2016) pour une méta-analyse sur ce thème. Cependant, peu d'études se sont intéressées à l'apport du geste Multitouch avec ce type de matériel d'apprentissage. Le premier intérêt de ce travail sera de rechercher un bénéfice du geste pour l'apprentissage dans ce domaine et avec ce type de matériel d'apprentissage.

En parallèle de la généralisation de ce type de technologie, un nouveau paradigme issu de la phénomologie voit son influence augmenter au sein de la communauté scientifique : la cognition incarnée. Nous avons expliqué, dans le chapitre deux, la genèse de ce mouvement. Nous y avons décrit les deux visions actuelles qui coexistent au sein de la communauté scientifique vis-à-vis de l'impact des actions motrices sur la cognition. Une première vision radicale propose de repenser toute la cognition en bannissant les représentations. L'inconvénient de cette approche est qu'elle permet surtout d'expliquer les bénéfices d'actions motrices sur des apprentissages procéduraux. Notre travail s'intéresse à l'acquisition de connaissances conceptuelles. Dès lors, nous avons décidé d'avoir une approche plus modérée qui consiste à envisager les actions motrices comme pouvant, dans certaines circonstances, participer aux phénomènes cognitifs. Nous pourrions donc appuyer sur les modèles existants de mémoire de travail pour proposer des mécanismes cognitifs impliqués lors de la production de gestes. Le deuxième intérêt de ce travail sera donc d'associer la production de gestes, en situation d'apprentissage, à des mécanismes cognitifs. La première hypothèse que nous faisons est que le geste peut servir de modalité d'encodage d'informations susceptible de venir soutenir les autres modalités d'encodages (visuelle et

auditive) existantes dans le modèle de Baddeley et Hitch (1974). La deuxième hypothèse est que le geste peut dans une activité cognitive basée sur une simulation permettre la focalisation de l'attention sur un point saillant qui facilitera le traitement de l'information et donc la connaissance à acquérir. Pour vérifier ce point, nous allons prendre comme cadre de référence le modèle TBRS de Barrouillet et al., (2004). Nous faisons l'hypothèse, que l'effet d'un geste sera de focaliser l'attention sur un point particulier. Ce faisant il augmentera la durée de traitement de l'information correspondant à ce point ce qui sera bénéfique pour le traitement d'informations et la construction du modèle mental associé mais pourra être néfaste pour la mémorisation d'informations si ce traitement devient trop long.

Cet attrait pour l'incorporation des phénomènes moteurs dans la cognition s'est également accompagné d'une augmentation des travaux sur les effets des gestes sur la cognition. Nous avons donc, toujours dans le chapitre deux, présenté également une analyse des gestes utilisés en fonction de la connaissance à apprendre. Nous avons extrait deux types de gestes, les gestes iconiques pour expliquer un mouvement et les gestes pour décrire un concept qui peuvent être iconiques ou métaphoriques selon la nature du concept à étudier. Cependant, la majorité de ces résultats est issue de travaux dans lesquels le geste venait en support du langage chez des jeunes enfants. Compte tenu de l'âge des apprenants, les concepts à maîtriser étaient donc relativement « simples ». La cognition incarnée présente donc souvent des résultats positifs pour l'apprentissage de connaissances procédurales. Le troisième intérêt de ce travail est donc de tester, si une action motrice limitée comme le geste réalisé sur une interface Multitouch, peut présenter des résultats positifs sur l'étude de concepts nécessitant une activité cognitive de plus haut niveau que celle réalisée par des jeunes enfants.

Enfin, les résultats des travaux sur les gestes semblent indiquer que l'utilisation de ceux-ci profitent aux personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales. Nous avons donc décrit dans le chapitre trois ces habiletés et leurs effets connus sur l'apprentissage des phénomènes dynamiques en sciences. A la vue de ces résultats, nous faisons l'hypothèse que parce que des activités mobilisant le geste devraient permettre de répondre aux exigences des traitements des informations spatiales, les habiletés visuo-spatiales seront une ressource utile à l'apprentissage uniquement en situations d'apprentissage qui ne mobilisent pas le geste. Cette hypothèse est testée dans les 3 études expérimentales de cette thèse.

La première des études (voir chapitre 4 : effet de l'interaction Multitouch sur une tâche spatiale) vise à rechercher un effet bénéfique d'un geste sur la réalisation d'une tâche spatiale

de comparaisons d'objets tridimensionnels. La tâche utilisée est une tâche de rotation réelle, réalisée avec un geste de rotation sur l'interface Multitouch. Des situations d'interaction au clavier et à la souris ont été introduites également, pour tester la nature de l'interaction et sa proximité avec l'objet à mettre en rotation. Un effet bénéfique sur l'apprentissage de l'interaction Multitouch est attendu du fait de la nature iconique du geste mis en jeu et de la proximité de cette interaction avec l'objet en rotation. Une situation de rotation automatique servira à contrôler l'effet de l'interaction et à rechercher un effet bénéfique de cette dernière. Enfin, rechercher un effet bénéfique du geste sur le développement des habiletés visuo-spatiales des apprenants est le deuxième objectif de cette étude.

La deuxième étude (voir Chapitre 5 : Effet du geste sur la compréhension de mouvements dans le champ de pesanteur terrestre) introduit un nouveau type de geste : le geste métaphorique. L'objectif est de rechercher un effet bénéfique de la réalisation de ce geste dans la compréhension des mouvements paraboliques d'objets dans le champ de pesanteur terrestre. Il s'agit donc de nouveau, de rechercher un effet bénéfique du geste comme modalité d'encodage d'information, permettant une meilleure représentation mentale du concept étudié. Un deuxième objectif de cette étude est toujours de rechercher le bénéfice de la mise en activité de l'apprenant lors de l'utilisation d'une simulation.

La dernière des trois études (voir Chapitre 6 : Effet du geste sur l'attention dans une tâche d'apprentissage scientifique) vise à étudier l'effet du geste en tant que modulateur de l'attention lors de l'utilisation d'un simulateur. Le concept étudié porte sur l'évolution de l'énergie mécanique lors de l'étude d'un mouvement. Dans cette expérience, une métaphore humaine est rajoutée puisqu'il s'agit d'étudier le mouvement d'un skateur sur une rampe. Le geste étudié est un geste iconique de suivi. Deux types de suivis sont étudiés : le suivi du mouvement d'un skateur et le suivi du mouvement d'une jauge d'énergie représentant l'évolution de l'énergie cinétique au cours du temps. Pour comprendre à quel niveau intervient le geste sur la compréhension de la simulation, cette dernière a été analysée en utilisant le modèle APM (Lowe & Boucheix, 2008). L'objectif de cette étude est donc de rechercher un effet bénéfique du geste sur la compréhension d'un phénomène dynamique en focalisant, grâce au geste, l'attention de l'apprenant sur les points saillants de l'animation. Nous attendons une meilleure prise en compte de ces points saillants et donc une meilleure construction ultérieure du modèle mental associé au concept étudié comme le prédit le modèle APM. Cette troisième expérience sera de plus l'occasion de tester la transposition de ce

modèle APM dans l'étude d'une animation n'impliquant pas la compréhension de mécanismes de pièces mais portant sur la compréhension de concepts physiques.

Partie II – Études expérimentales

Chapitre 4 : Effet du geste Multitouch dans une tâche spatiale.²

4.1 Introduction

Nous allons maintenant décrire la première des trois études visant à évaluer l'apport du geste dans l'apprentissage. Dans cette tâche, les participants devaient, à l'aide d'un logiciel, mettre en mouvement des objets tridimensionnels. Les mouvements possibles étaient des mouvements de rotation autour de trois directions de l'espace.

Le premier objet de cette étude est de rechercher l'influence d'une interaction entre le participant et l'objet à mettre en mouvement. Deux types de modalités ont donc été mises en œuvre : la mise en rotation de l'objet par le participant et l'observation d'objets en rotation automatique.

Le deuxième point qui nous intéressait dans cette expérience était l'influence du type de geste réalisé par le participant lors de l'interaction. Pour tester cela, trois modalités d'interactions permettant de faire varier la nature des gestes produits ont été testées :

- Une interaction Multitouch permettant la réalisation de gestes directement sur l'objet à mettre en mouvement et permettant la mise en rotation continue autour de deux axes. Un vrai geste de rotation a été utilisé dans cette modalité.
- Une interaction à la souris permettant elle aussi la mise en rotation continue autour de deux axes mais cette fois déportée visuellement de l'objet. Les gestes utilisés correspondaient à des gestes de translation de la souris mettant en rotation l'objet autour d'un axe.
- Une interaction au clavier ne permettant que la rotation autour d'un axe à la fois. Cette interaction est également déportée. Les gestes produits étaient de simples clics sur une touche.

Enfin cette expérience permettait de tester l'influence des habiletés visuo-spatiales sur les variables testées dans les deux points précédents, à savoir le degré de réussite pour la tâche mise en œuvre et le type de stratégies mis en œuvre pour la réaliser. La tâche proposée était en effet susceptible de nécessiter l'utilisation de la rotation mentale.

² Ce travail a fait l'objet d'une communication à la 17^{ème} conférence bi-annuelle EARLI à Tempere en Finlande (2017)

Il a été décidé dans cette première expérience de ne pas travailler sur une tâche scolaire, par définition complexe et mettant en jeu divers paramètres pouvant influencer sur la réalisation de la tâche (niveau de connaissances antérieures par exemple). En effet, cette complexité de la tâche risquerait de cacher les effets du geste car cet effet, s'il existe, risque d'être peu important. Nous avons donc choisi une tâche de rotation mettant en jeu seulement des compétences spatiales, compétences qui nous l'avons vu dans la première partie sont un prédicteur de réussite des activités en sciences. Par contre, les études suivantes porteront sur des tâches scolaires dans le domaine de la physique-chimie.

La tâche à réaliser dans cette première étude était donc une tâche de reconnaissance d'objets 3D. Il fallait déterminer si deux objets orientés différemment dans l'espace présentaient, ou non, la même structure. Les objets utilisés étaient des figures similaires à celles utilisées par Shepard et Metzler (1971) (cf. Figure 5)

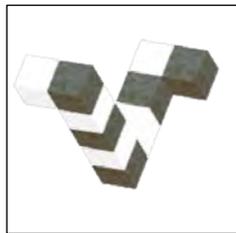


Figure 5 : exemple de figure utilisée dans l'expérience

Pour mener à bien cette tâche de reconnaissance d'objets 3D, l'objet pouvait tourner dans l'espace autour de trois axes. Diverses modalités étaient disponibles pour réaliser cette rotation. Les modalités d'interaction clavier et souris étaient utilisables et ont pu être comparées à l'interaction directe Multitouch. Pour cette dernière, un geste iconique de rotation a été implémenté dans l'interface. Enfin, un groupe réalisant la même tâche sans interaction avec l'objet étudié servait de groupe de référence à cette étude pour tester l'effet de l'interaction utilisateur. Nous avons également étudié l'influence des habiletés visuo-spatiales des participants sur la réussite à la tâche proposée en fonction de la modalité d'interaction. Intéressons-nous donc, dans une première partie, aux habiletés visuo-spatiales qui étaient susceptibles d'être mises en jeu dans cette activité.

4.2 Nature des habiletés visuo-spatiales mises en jeu dans cette expérience.

Sur un test similaire à la tâche mise en œuvre dans cette expérience, le test de Vandenberg et Kuse (1978), Hegarty (2010) a mis en évidence six types de stratégies différentes. Sur la tâche proposée ici, qui permet en plus une rotation de l'objet à identifier dans l'espace, plusieurs types d'habiletés peuvent donc être envisagées. Cependant, il est

probable que la stratégie prépondérante découle de la seule modalité d'interaction disponible dans l'interface et qui consiste à mettre l'objet en rotation. En utilisant la classification des habiletés visuo-spatiales évoquée dans la partie théorique de ce travail, nous pouvons donc penser que l'habileté prépondérante qui devrait intervenir dans cette tâche de rotation est de type dynamique et intrinsèque. En effet, pour discriminer l'objet dans l'espace, l'utilisateur pourra faire effectuer une rotation à l'objet sur l'interface. Mais il pourra également effectuer mentalement cette rotation. Enfin, il pourra envisager une stratégie intermédiaire, à savoir commencer par une rotation de l'objet dans l'interface pour amorcer le processus de reconnaissance et le terminer par une rotation mentale de l'objet.

D'autres stratégies sont cependant possibles. Il est envisageable, vu que les objets sont composés de cubes assemblés de deux couleurs (alternativement blanc et noir) qu'un utilisateur utilise une stratégie analytique consistant à compter les cubes ce qui mettrait plutôt en jeu une habileté de type intrinsèque et selon la classification évoquée précédemment. Enfin, il est possible d'envisager que des personnes tentent de changer de point de vue (de manière mentale) en essayant d'observer l'objet depuis une position différente plutôt que de la faire tourner. Dans ce cas les habiletés visuo-spatiales mises en jeu seraient de nature extrinsèque et dynamique.

Quelle que soit la stratégie prépondérante mise en œuvre dans la tâche d'entraînement, si un effet du geste est observé, il sera intéressant d'envisager le bénéfice en termes de développement de l'habileté à la rotation mentale. Dans la partie suivante, nous allons donc nous intéresser à l'entraînement de ces habiletés spatiales et à leur transfert dans des tâches d'apprentissage.

4.2.1 Développement des habiletés visuo-spatiales.

Nous avons vu dans la partie précédente que les habiletés visuo-spatiales pouvaient être entraînées. Si on s'intéresse plus particulièrement aux habiletés de type dynamique et intrinsèque comme la rotation mentale, Adams, Stull et Hegarty (2014) ont montré que s'entraîner à partir d'une tâche de rotation réelle permet d'améliorer les capacités de rotation mentale. Nous utiliserons donc cette stratégie dans cette étude. Dans la partie suivante, nous allons donc essayer de distinguer les processus mis en jeu dans les deux types de rotation : mentale et physique.

4.2.2 Rotation mentale et rotation physique

Dans son analyse concernant la neuro-imagerie des rotations mentales, Zacks (2008) précise que les aires motrices sont également activées lors de rotation mentale : tout se passe

donc comme si les utilisateurs simulaient mentalement une rotation de l'objet avec leurs mains lors de la réalisation d'une rotation mentale. Mais est-ce toujours le cas ?

Dans leur revue de littérature sur la rotation mentale et sur les processus moteurs, Hoyek, Collet, et Guillot (2010) distinguent plutôt :

- Une stratégie interne, avec une simulation de l'action sur l'objet qui activerait les zones motrices.
- Une stratégie externe, plus visuelle qui correspondrait au changement de point de vue de l'observateur par rapport à l'objet.

Cette distinction sur les deux types de stratégie est très proche des habiletés visuo-spatiales de type dynamique intrinsèque et extrinsèque évoquées dans la partie précédente. Mais est-ce des habiletés visuo-spatiales qui amènent à privilégier telle ou telle stratégie ?

Pour Hoyek et al. (2010), ce serait plutôt la nature de l'objet qui ferait privilégier une ou l'autre des stratégies. Un objet manipulable comme un marteau ou la rotation d'un membre corporel comme une main ferait privilégier une stratégie interne alors qu'un objet comme celui utilisé par Shepard et Metzler (1971) ferait privilégier une stratégie externe. Mais d'autres études viennent remettre en cause cette conclusion. En effet, Kawamichi, Kikuchi, Noriuchi, Senoo et Ueno (2007) ont montré que la rotation de ce type d'objet 3D dans un plan (rotation 2D) impliquait une stratégie visuelle alors que la rotation du même objet dans l'espace (rotation 3D) impliquait une stratégie motrice. Notre expérience étant basée sur la mise en œuvre de rotation de type 3D, il semble là encore que la stratégie interne (qui active les zones motrices) serait donc privilégiée dans le cas de la mise en œuvre d'une rotation mentale durant l'expérience.

Dans le cas de la manipulation directe d'un objet nous aurons une action motrice ayant pour effet direct la rotation de l'objet. La situation est très proche dans le cas du Multitouch car l'action motrice est directement effectuée sur l'objet. Par contre, dans le cas de l'utilisation d'une souris (ou d'un clavier) l'action motrice est déportée. La mise en rotation de l'objet n'est qu'une conséquence indirecte de cette action motrice. Il sera donc intéressant de voir si le type d'entraînement sur une interface Multitouch améliore plus les habiletés en rotation mentale des participants que dans le cas d'une interaction clavier ou souris.

Enfin, dans le type d'épreuve envisagé dans cette étude, il est possible que les participants mettent en jeu les deux types de stratégie : rotation réelle de l'objet couplée à de la rotation mentale. Il sera donc intéressant de vérifier si un type d'interaction favorise une stratégie plutôt qu'une autre. Une analyse de la disparité angulaire entre les objets à comparer

permettra de vérifier ce point comme nous le détaillerons plus loin dans la description du protocole mis en jeu.

4.3 Hypothèses

Nous formulons quatre hypothèses à partir des considérations précédentes :

- Hypothèse 1 : Réaliser une tâche de comparaison d'objets nécessitant une rotation mentale ou externe des objets devrait être mieux réussie si l'utilisateur peut interagir avec l'objet à mettre en rotation que s'il ne peut pas interagir (i.e. uniquement observer les rotations de l'objet). En effet, sans interaction sur l'objet, et donc sans mobilisation de gestes, il est probable que l'utilisateur soit amené à plus utiliser la rotation mentale.
- Hypothèse 2 : L'utilisation de gestes significatifs avec la tâche comme des gestes de rotations sur l'interface Multitouch et le fait que cette interaction se fasse directement sur l'objet devraient amener les participants à mieux réussir la tâche proposée. Le bénéfice devrait être accentué pour les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales.
- Hypothèse 3 : Un participant possédant de faibles habiletés visuo-spatiales en rotation mentale sera, de plus, contraint de mettre en place des stratégies sollicitant d'autres habiletés comme nous l'avons évoqué dans la partie précédente.
- Hypothèse 4: Le fait de réaliser des rotations réelles dans la tâche devrait améliorer les facultés des utilisateurs en rotation mentale en accord avec les résultats de Adams, Stull, et Hegarty (2014). L'amélioration devrait être plus marquée dans le cas de l'interface Multitouch utilisant des gestes significatifs.

4.4 Méthodologie

4.4.1 Participants

74 étudiants en licence de psychologie (61 filles et 13 garçons) d'âge compris entre 20 et 32 ans (moyenne 22.6 ans et écart-type de 2,0 ans) ont été recrutés sur la base du volontariat pour passer cette étude. Une gratification sous forme de bons cadeaux de 10 euros était proposée pour la réalisation de cette tâche.

4.4.2 Matériel

4.4.2.1 Pré-test des habiletés visuo-spatiales

Ce test consistait à une analyse des habiletés en rotation mentale des participants. Le niveau initial en rotation mentale a été évalué par un pré-test adapté de celui de Vandenberg et Kuse. (Vandenberg & Kuse, 1978 ; Albaret & Aubert, 1996). Une version informatisée de ce test a été proposée. Le participant devait, après une phase de familiarisation portant sur deux items, répondre à deux séries de 10 items disponibles en annexe 1. Pour chaque item, un objet similaire à ceux utilisés par Shepard et Metzler (1971) était proposé avec une orientation dans l'espace. Quatre autres objets étaient proposés dans des orientations spatiales différentes dont deux étaient identiques à l'objet de départ et deux de constitutions différentes. L'utilisateur doit reconnaître, pour chaque item, s'il était similaire ou différent de l'item de départ (cf. Figure 6). Un point était attribué à chaque item réalisé correctement. La note maximale était donc de 20 pour ce test de 20 items.

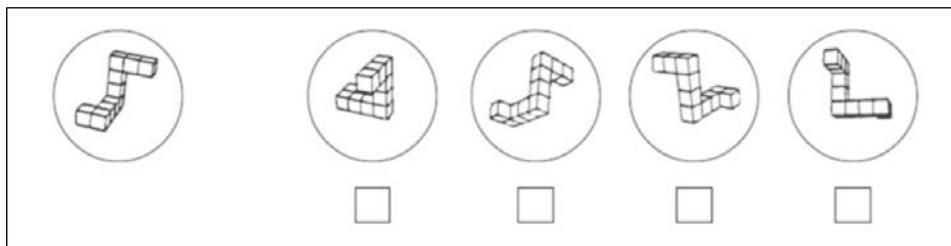


Figure 6 : Premier item du test de rotation mentale proposé.

4.4.2.2 Questionnaires sur les pratiques des utilisateurs.

Afin de répartir les étudiants en 4 groupes, un questionnaire concernant le niveau d'étude et l'utilisation régulière de jeux vidéo 2D et 3D a été présenté aux participants. En effet, l'utilisation de jeux vidéo pouvant aider aux développements des habiletés visuo-spatiales (Sanchez, 2012), il semble pertinent de contrôler ce point. Une échelle en 5 points a été utilisée pour mesurer la fréquence, auto-rapportée, de la pratique de jeux vidéo par les participants avec comme graduation « jamais », « à l'occasion » ... (cf. Annexe 1 pour la visualisation de l'échelle présentée aux participants).

4.4.2.3 Logiciel utilisé dans l'expérience

Description de l'interface :

Un logiciel présentant des couples de figures identiques à celles utilisées par Shepard et Metzler (1971) a été développé en utilisant le moteur de jeu Unity (cf. Figure 7). Le logiciel propose 36 scènes composées de figures différentes. Ces 36 scènes sont proposées en 3 séries de 12. En plus d'une barre de progression située en haut à gauche de l'écran, un message entre les séries prévient l'utilisateur de l'avancée de l'entraînement lors du passage d'une série à l'autre.

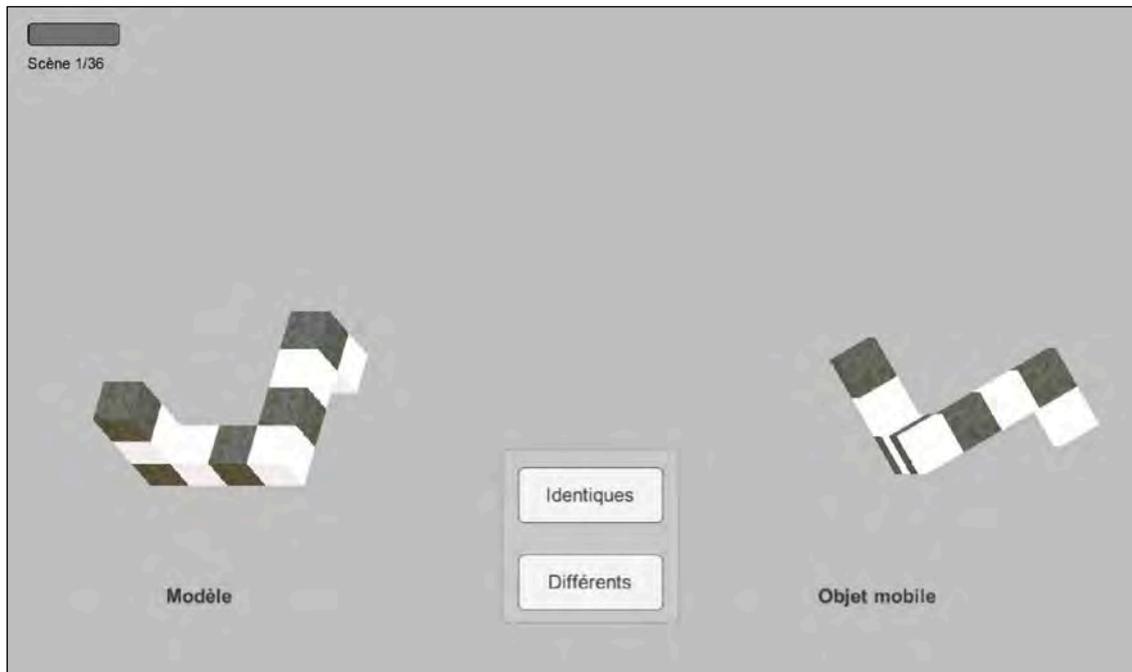


Figure 7 : Un des 36 cas proposé dans la phase d'entraînement.

Le logiciel affiche un modèle fixe d'un objet 3D sur la partie gauche. Ce modèle est constitué de dix cubes noirs et blancs assemblés (couleurs alternées). Sur la partie droite est proposée une figure mobile, soit identique soit différente. Lorsqu'elle est différente, la figure peut être image du modèle dans un miroir ou formée de branches différentes. Cette figure a subi une rotation dans l'espace par rapport au modèle. L'utilisateur doit le plus rapidement possible dire si les figures sont identiques ou différentes en cliquant sur un des boutons correspondants entre les deux figures.

Difficulté des scènes proposées

Sur les 36 cas proposés, 17 couples de figures étaient constitués de figures identiques et 19 couples constitués de figures différentes. Les différentes figures ont été construites à

partir de la librairie de Peters et Battista (2008). Il a été également tenu compte, dans la constitution des couples et des configurations de départ des objets dans l'espace, de la difficulté. Cette difficulté dans la réalisation de cette tâche, décrite par Caissie, Vigneau, et Bors (2009), est induite par les configurations de départ des objets dans l'espace et la forme des objets. En effet, ces auteurs ont montré que différents points entraînent en jeu dans la difficulté de la tâche comme par exemple :

- L'occlusion d'une partie de la figure (partie cachée) qui peut rendre plus difficile son identification. La figure ci-dessous (cf. Figure 8) présente un cas d'occlusion (partie de la figure cachée).

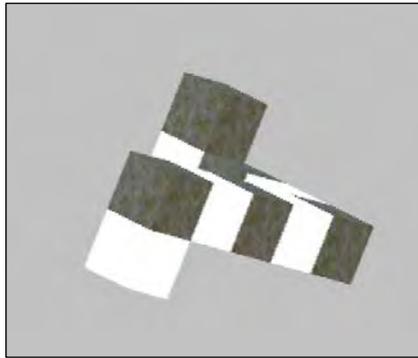


Figure 8 : figure présentant une occlusion.

Dans notre tâche, cette occlusion ne sera présente que sur l'objet mobile : en effet la rotation de cet objet permettra de lever cette dernière. Une occlusion sur l'objet immobile rendrait très difficile la tâche d'identification de ce dernier. Cela induirait la mise en place de stratégies contreproductives avec celles testées dans cette étude. Sur les 36 couples d'items construits 16 présentaient donc une occlusion plus ou moins importante sur l'objet mobile.

- La nature du distracteur : le distracteur peut différer de l'objet modèle à reconnaître en étant l'image de ce dernier dans un Miroir (cf. Figure 9) ou en ayant une structure différente de ce dernier (longueur des branches différentes). Le distracteur de type Miroir se révèle être plus difficile. Dans cette étude, sur les 19 cas présentant des distracteurs, 10 étaient de type structurel et 9 de type miroir.

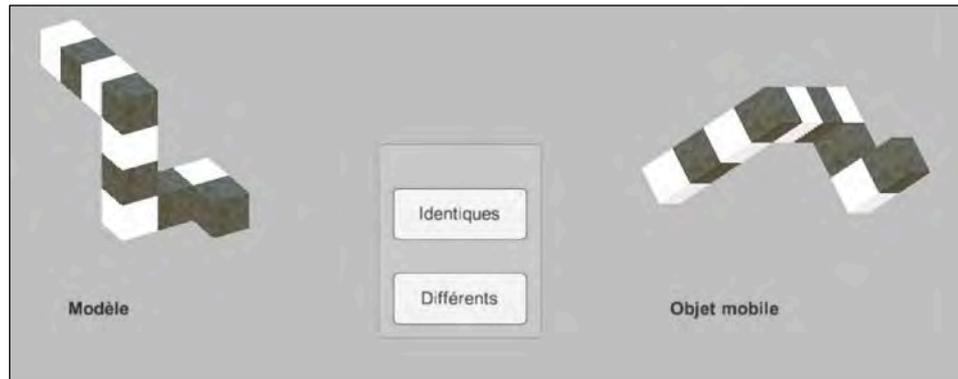


Figure 9 : scène présentant un distracteur de type miroir

- La nature des branches latérales de l'objet : les objets composés de branches latérales présentant le même nombre de cubes (objets homogènes cf. Figure 10) seront plus difficiles à discriminer que les objets présentant un nombre de cubes différents dans les branches latérales (branches hétérogènes). Ce dernier point laisse penser qu'une stratégie de comptage des cubes des branches latérales peut être mise en jeu, en plus des différences de couleurs entre les cubes. Dans cette étude la moitié des scènes (18) présentaient des objets de type homogènes.

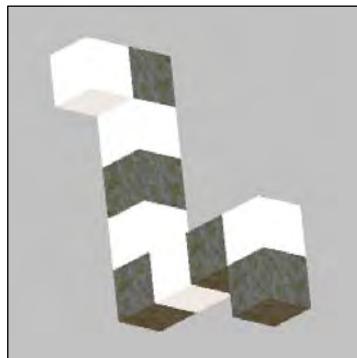


Figure 10 : objet de type homogène.

Les difficultés ont été réparties de manière la plus équilibrée possible entre les 36 scènes. Certains cas cumulaient bien toutes les difficultés (distracteur de type miroir et homogène présenté avec une occlusion), mais ces cas ne représentaient que 2 cas sur les 36 proposés.

4.4.2.4 Présentation des modalités d'interaction :

Quatre logiciels différents seulement au niveau de la modalité d'interaction ont été développés. Pour l'un des quatre, l'objet mobile était en rotation automatique. Il n'y avait pas

dans ce cas d'interaction possible entre l'utilisateur et l'objet en rotation. L'objet tournait à vitesse constante autour de deux axes selon un mouvement programmé qui permettait, tôt ou tard, d'observer sa structure de manière complète (sans occlusions visuelles).

Pour les autres versions, l'utilisateur pouvait faire tourner l'objet mobile dans l'espace selon l'une des modalités d'interaction suivantes : clavier, souris ou Multitouch. (cf. Figure 11).

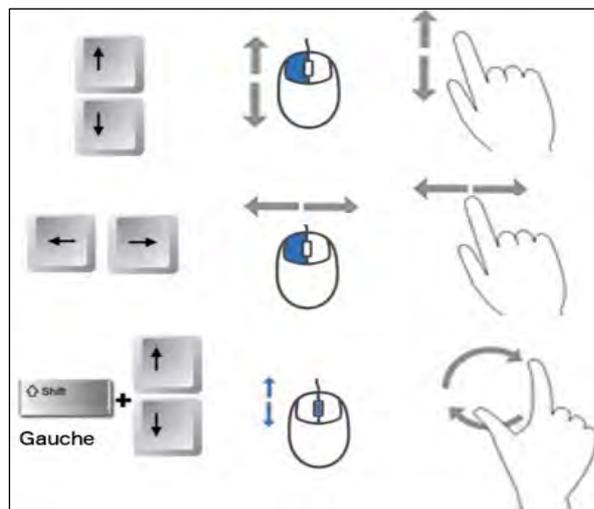


Figure 11 : Présentation des modalités d'interaction sur l'objet mobile (à gauche condition clavier, au milieu condition souris, à droite condition multitouch).

Détaillons ces trois modalités :

- Pour mettre en rotation l'objet à l'aide de l'interface Multitouch deux types de gestes ont été implémentés : un geste de rotation à deux doigts pour la rotation autour d'un axe et des gestes de translation horizontaux et verticaux pour les rotations autour des deux autres axes. Ces gestes réalisés sur l'objet restent néanmoins d'amplitudes limitées à cause de la taille réduite des objets manipulés et de l'écran de la tablette.
- L'interaction à la souris ne proposait pas la réalisation de gestes de rotation mais seulement de gestes de translation. Deux étaient identiques à ceux réalisés en Multitouch. Le geste de rotation Multitouch était remplacé par un geste de mise en mouvement de la molette de la souris. Les gestes étaient déportés visuellement de l'objet en mouvement. La modalité souris permettait cependant la réalisation de mouvement de plus grande amplitude qu'en Multitouch.
- L'interaction au clavier consistait à de simples appuis sur les flèches du clavier. Les flèches verticales seules permettaient la rotation autour d'une

direction de l'espace. L'utilisation simultanée de la touche Shift Gauche permettait la rotation autour d'un deuxième axe et les flèches horizontales permettaient la rotation autour du troisième axe. Les mouvements étaient déportés visuellement comme pour la souris mais également de nature limitée : simple appui sur des touches.

Pour ces modalités mettant en jeu l'interaction de l'utilisateur, une phase d'appropriation des commandes pour manipuler l'objet a été implémentée afin de familiariser les participants avec l'interface avant le début de l'exercice. Elle consistait à manipuler un robot dans l'espace pendant une durée libre, dans la limite de trois minutes, avec une jauge de temps affichant le temps restant disponible (cf. Figure 12).



Figure 12 : phase d'entraînement pour la modalité d'interaction MultiTouch

Le logiciel mettant en œuvre la modalité d'interaction Multitouch a été utilisé sur une tablette iPad air présentant un écran Multitouch de 10 pouces. Les trois autres logiciels concernant les modalités automatiques, clavier et souris ont été utilisés sur des PC fixes avec comme système d'exploitation Windows et présentant des écrans de taille 19 pouces.

4.4.2.5 Enregistrement des traces de l'activité

L'exactitude des réponses, le temps de réponse, les positions prises par l'objet mobile ainsi que la disparité angulaire (DA) entre l'objet de départ et l'objet mobile au moment de la réponse étaient enregistrées de manière automatique et transparente sur un fichier annexe de type csv. Décrivons maintenant ce que représente la disparité angulaire.

Dans le moteur de jeu Unity, les directions des objets et leurs rotations dans l'espace sont représentées par des quaternions unitaires. Un quaternion est un objet mathématique possédant quatre composantes x , y , z et w dont la description serait ici inutile pour la compréhension de cette étude. Comme les orientations dans l'espace de l'objet modèle de départ et de l'objet mobile lors de la réponse de l'utilisateur étaient repérées dans le logiciel par des quaternions, nous avons mesuré la disparité angulaire DA entre ces deux orientations lors de la réponse de l'utilisateur. Cette disparité angulaire correspond à un angle représentant la différence d'orientation dans l'espace entre les deux objets. Une disparité angulaire nulle revient à dire que l'utilisateur a orienté dans l'espace les deux objets de manière identique avant de répondre. Plus cette disparité angulaire est importante, plus les directions entre les deux objets seront différentes lors de la réponse. Cela est probablement le signe d'une utilisation de la rotation mentale par l'utilisateur plus importante. La disparité angulaire a été calculée en utilisant la méthode décrite par Gardony, Taylor, et Brunye (2014).

4.4.2.6 Stratégies auto-rapportées et ressenti des utilisateurs :

Questionnaires sur les stratégies utilisées.

Un questionnaire afin d'estimer les stratégies de résolution utilisées par les participants (rotation de l'objet dans le logiciel, rotation mentale, superposition d'objets, comptage des cubes de couleurs...) a été élaboré pour cette étude et administré en ligne à l'aide du logiciel Qualtrics (cf. Figure 13). La première question concernant le fait de faire tourner l'objet à l'écran en interagissant avec le logiciel n'était pas proposée au groupe avec rotation automatique.

Pour réaliser ces exercices :					
	Pas du tout	Rarement	Quelques fois	Souvent	Tout le temps
j'ai fait tourner la figure à l'écran	<input type="radio"/>				
j'ai fait tourner la figure dans ma tête	<input type="radio"/>				
j'ai compté les cubes	<input type="radio"/>				
j'ai comparé les couleurs des cubes	<input type="radio"/>				
j'ai utilisé une autre stratégie	<input type="radio"/>				

Figure 13: stratégies utilisées durant la tâche.

De même il a été demandé aux utilisateurs s'ils pensaient qu'interagir sur l'objet pour le mettre en mouvement leur avait facilité la tâche et permis de répondre plus rapidement. (cf. Figure 14).

<p>Le fait de tourner l'un des deux objets à l'écran vous a aidé à déterminer plus facilement si les deux objets étaient identiques :</p> <p><input type="radio"/> Pas du tout d'accord</p> <p><input type="radio"/> Pas d'accord</p> <p><input type="radio"/> Plutôt pas d'accord</p> <p><input type="radio"/> Plutôt d'accord</p> <p><input type="radio"/> D'accord</p> <p><input type="radio"/> Tout à fait d'accord</p>
<p>Le fait de tourner l'un des deux objets à l'écran vous a aidé à répondre plus rapidement aux exercices :</p> <p><input type="radio"/> Pas du tout d'accord</p> <p><input type="radio"/> Pas d'accord</p> <p><input type="radio"/> Plutôt pas d'accord</p> <p><input type="radio"/> Plutôt d'accord</p> <p><input type="radio"/> D'accord</p> <p><input type="radio"/> Tout à fait d'accord</p>

Figure 14 : ressenti sur l'aide apportée par l'interaction.

4.4.3 Procédure

Dans une première étape les utilisateurs ont passé le pré-test adapté visant à mesurer leurs habiletés en rotation mentale. Ils ont également répondu au questionnaire sur leur pratique des jeux vidéo.

Suite à ces tests, les participants ont été répartis en 4 groupes similaires avec contrôle des distributions des variables suivantes dans les groupes :

- Le genre.
- Le niveau d'étude.
- Les habiletés à la rotation mentale.
- L'utilisation régulière de jeux vidéo 2D et 3D.

La semaine suivante les participants ont été conviés sur une séance d'une heure pour réaliser l'entraînement à la reconnaissance d'objets en 3D sur le logiciel développé sur Unity. En fonction du groupe attribué l'utilisateur a utilisé le logiciel développé sur Unity dans l'une des 4 conditions :

1. Condition sur ordinateur fixe avec la modalité d'interaction Clavier.
2. Condition sur ordinateur fixe avec la modalité d'interaction Souris.

3. Condition tablette pour les participants disposant de la version avec interaction Multitouch.

4. Condition automatique (i.e. sans geste, la figure tourne de manière automatique).

A la fin de l'étude sur le logiciel, les participants de tous les groupes ont répondu sur un ordinateur fixe au questionnaire sur les stratégies utilisées, ainsi qu'au questionnaire sur l'apport de la rotation de l'objet pour réaliser la tâche sur la facilité et la rapidité de réponse. En effet, l'interface du logiciel Qualtrics était plus conviviale sur ce type d'appareil et restait identique pour tous les participants. Ensuite, un post-test des habiletés visuo-spatiales similaire au pré-test leur était proposé, toujours sur ordinateur, pour évaluer l'effet de cet entraînement sur l'évolution des habiletés à la rotation mentale.

4.5 Hypothèses opérationnelles

- Hypothèse 1 : Pour cette première hypothèse qui portait sur l'influence de l'interaction entre l'utilisateur et l'objet à discriminer on s'attendait à ce que les groupes pouvant interagir avec les figures obtiennent des scores de performances plus élevés à la tâche de comparaison des figures. De plus, on s'attendait à ce que les temps de réalisation soient plus courts que pour le groupe utilisant la rotation automatique. Enfin, le groupe automatique devrait davantage rapporter des stratégies de rotation mentale et aboutir à des disparités angulaires plus élevées que les 3 groupes interagissant avec les figures.
- Hypothèse 2 portant sur la nature du geste : nous attendions des scores de performances supérieurs à la tâche de comparaison d'objets pour le groupe Multitouch par rapport aux groupes clavier et souris grâce à l'interaction directe avec la tablette sur l'objet à mettre en rotation et grâce à l'utilisation d'un geste de rotation signifiant avec la tâche de rotation effectuée.
- Hypothèse 3 portant sur l'influence des habiletés visuo-spatiales : Nous attendions que les participants ayant de faibles habiletés visuo-spatiales soient contraints de mettre en œuvre des stratégies complémentaires à la rotation mentale qui apparaîtraient dans les stratégies auto-rapportées. Enfin, nous attendions que les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales profitent plus du geste direct Multitouch dans la tâche de comparaison d'objets.

- Hypothèse 4: Pour cette quatrième hypothèse qui portait sur les bénéfices de la tâche réalisée, nous attendions que la réalisation de rotations réelles dans la tâche améliore les facultés des utilisateurs en rotation mentale en accord avec les résultats de Adams, Stull, et Hegarty (2014) et que donc les utilisateurs des différents groupes obtiennent une amélioration de leur score au post-test. Là encore, nous attendions un bénéfice supérieur de la modalité Multitouch dans le développement des habiletés en rotation mentale par rapport aux modalités clavier et souris grâce à un entraînement plus efficace avec la modalité Multitouch comme expliqué dans l'hypothèse deux.

4.6 Résultats

Sans surprise, et conformément à la littérature, l'utilisation du coefficient de corrélation de Pearson a montré que les scores obtenus au pré-test sur les habiletés visuo-spatiales étaient fortement corrélés avec l'utilisation régulière de jeux vidéo 3D par les participants : $r(72) = .415, p < .001$.

4.6.1 Performances à la tâche :

Nous avons fait l'hypothèse que l'interaction de l'utilisateur avec l'objet à comparer favoriserait la réussite à la tâche de comparaison. Afin de rechercher également si un effet pouvait être lié au niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant nous avons donc réalisé une ANOVA à deux facteurs avec comme facteurs, le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Le niveau d'habiletés spatiale était mesuré par le score réalisé par le participant sur le test de rotation mentale administré en pré-test.

Un effet significatif du type d'interaction entre le logiciel et l'utilisateur est bien apparu sur les scores obtenus concernant les réponses exactes et cela avec une taille d'effet importante, $F(3,73)=17.38, p<.001, \eta^2_{\text{partial}}=.44$. Afin d'interpréter l'effet principal du type d'interaction, un test de comparaisons multiples (Bonferroni) a été réalisé. Il a montré que l'effet de l'interaction était dû au groupe utilisant la modalité automatique qui a obtenu de moins bons résultats ($M = 23.6, E.T. = 5.13$) que les groupes avec interaction clavier ($M = 31.1, E.T. = 3.56$), souris ($M = 30.6, E.T. = 3.41$) et Multitouch ($M = 30.3, E.T. = 2.55$), $p < .001$ dans les trois cas. En revanche, contrairement à nos hypothèses aucune différence significative n'a été observée entre les groupes utilisant la rotation de l'objet avec les dispositifs clavier, souris ou interface Multitouch (cf. Figure 15).

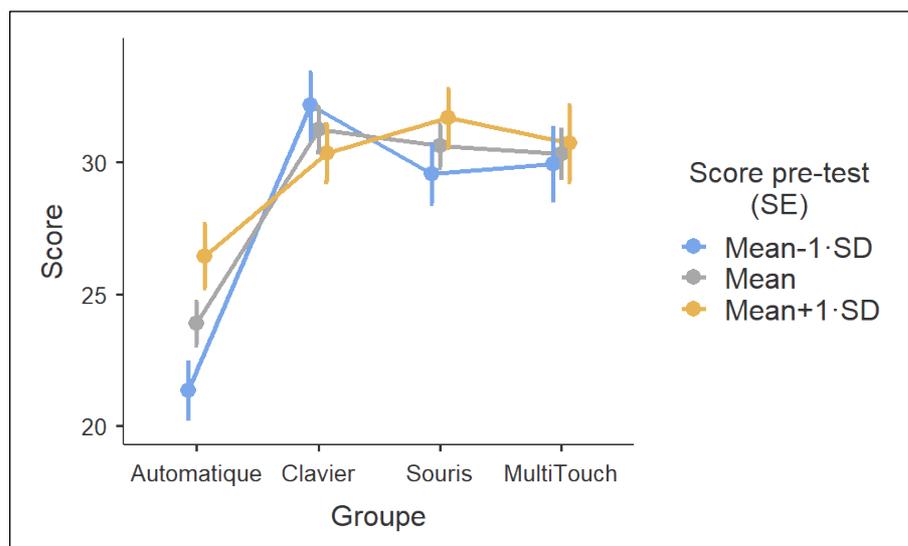


Figure 15 : Score obtenu à la tâche (max = 36) selon le groupe

En ce qui concerne l'effet des habiletés visuo-spatiales, nous n'avons pas observé d'effet significatif de celles-ci, $F(1,73)=3.06$, $p = .085$. En revanche, nous avons observé un effet d'interaction entre le groupe du participant et le niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(3,73)=3.14$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{partial}}=.125$. Afin d'interpréter l'interaction, les analyses des effets simples ont révélé que les habiletés visuo-spatiales avaient un effet positif sur les performances dans la condition automatique, $p = .002$, mais pas dans les conditions, clavier, $p = .267$, souris, $p = .183$, ou encore Multitouch, $p = .727$. Les habiletés visuo-spatiales ne semblent plus expliquer la variance des résultats observés dès lors qu'une interaction a lieu, alors qu'elles expliquent une partie de la variance des performances des participants dans la condition de rotation automatique.

4.6.2 Durée de réalisation de la tâche :

Afin d'étudier l'effet de la modalité d'interaction sur la durée de réalisation de la tâche, nous avons réalisé une ANOVA à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en covariable dans le modèle). (cf. Figure 16).

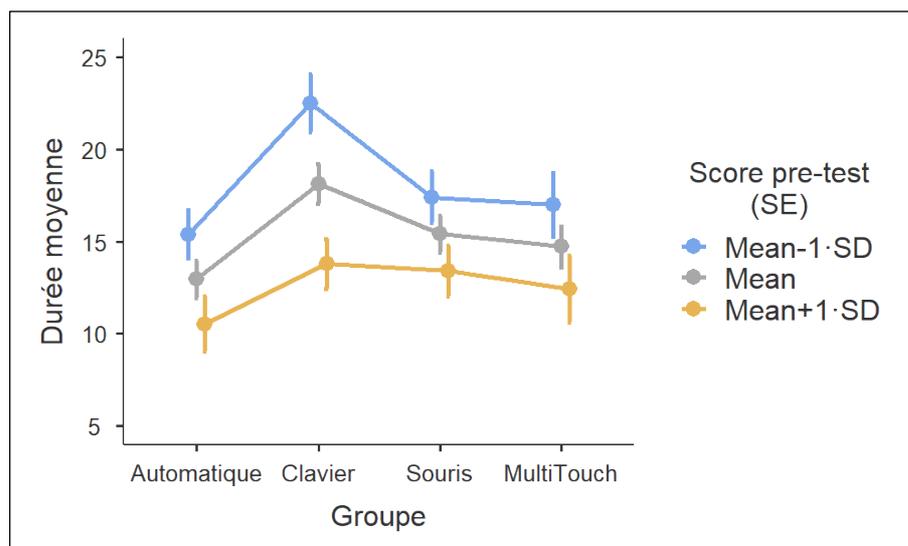


Figure 16 : Durée moyenne de réponse par scène.

Un effet significatif du type d'interaction entre le logiciel et l'utilisateur a été révélé par cette analyse sur la durée moyenne de réalisation par item, $F(3,73) = 4.25$, $p = .008$, $\eta^2_{\text{partiel}} = .162$. Un test de comparaisons multiples (Bonferroni) a révélé que cet effet était dû à la différence de durée moyenne de réponse entre les groupes à rotation automatique ($M = 13.3$, $E.T. = 4.72$) et clavier ($M = 17.4$, $E.T. = 7.21$), $p = .005$.

Un effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales a également été obtenu, $F(1,73) = 25.68$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{partiel}} = .280$. Les participants ayant de fortes habiletés visuo-spatiales ont répondu le plus rapidement. Nous n'avons pas observé d'interaction entre ces deux variables, $F(3,73) = 1.12$, $p = .346$.

4.6.3 Stratégies auto-rapportées :

En ce qui concerne la stratégie auto-rapportée, à l'aide du questionnaire, concernant la rotation mentale utilisée, une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle) a montré un effet significatif du type d'interaction, $F(3,73) = 11.731$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{partiel}} = .348$. Un test de comparaisons multiples (Bonferroni) a montré que la différence se situait entre la modalité automatique ($M = 4.35$, $E.T. = .813$) et les modalités clavier ($M = 3.11$, $E.T. = 1.13$), souris ($M = 2.40$, $E.T. = 1.39$) et Multitouch ($M = 2.81$, $E.T. = 1.22$), $p < .001$ entre les groupe Automatique et Souris, $p = .001$ entre les groupes Automatique et Multitouch et $p = .009$ entre les modalités Automatique et clavier) (cf. Figure 17). Ces résultats confirment donc bien une utilisation importante de la stratégie de rotation mentale chez les participants du groupe automatique comparativement aux trois autres.

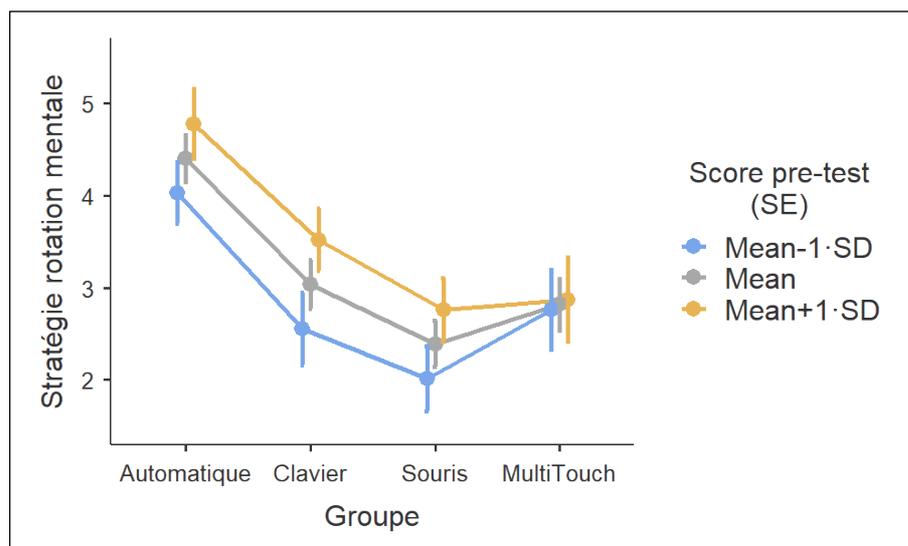


Figure 17 : stratégie évoquée de type rotation mentale.

Un effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales a également été obtenu, $F(1,73) = 5.517, p = .022, \eta^2_{\text{partial}} = .077$. Les participants ayant de fortes habiletés visuo-spatiales déclarent utiliser plus la rotation mentale que ceux ayant de faibles habiletés visuo-spatiales. Nous n'avons cependant pas obtenu d'interaction entre ces deux effets principaux, $F(3,73) = .350, p = .790$.

Cette différence de stratégie évoquée entre les différents groupes est bien confirmée par la mesure objective de disparité angulaire (DA) moyenne entre l'objet modèle et l'objet cible lors de la réponse. Une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle) a montré un effet significatif de la modalité d'interaction sur la valeur moyenne de la disparité angulaire, $F(3,70) = 102.104, p < .001, \eta^2_{\text{partiel}} = .823$. Un test de comparaisons multiples (Bonferroni) a montré que la différence se situait, là encore, entre la modalité automatique ($M = 114, E.T. = 10.3$) et les modalités clavier ($M = 44.0, E.T. = 16.5$), souris ($M = 43.2, E.T. = 19.7$) et Multitouch ($M = 44.7, E.T. = 11.0$), $p < .001$ dans les trois cas (cf. Figure 18). La disparité angulaire est donc plus élevée pour le groupe automatique que pour les trois autres groupes d'interaction.

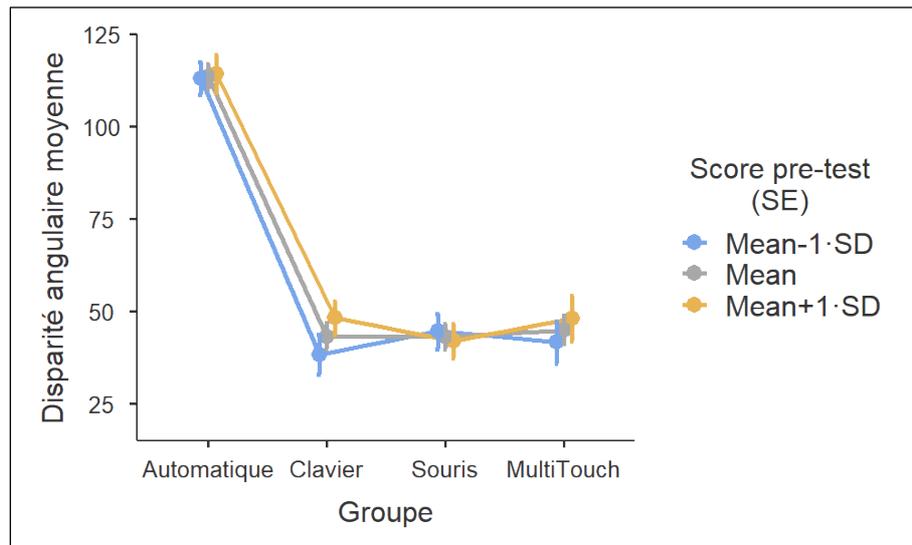


Figure 18 : Disparité angulaire moyenne selon la condition d'interaction.

En revanche, contrairement à ce que les participants ont déclaré, nous n'avons pas observé d'effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales sur le recours à la rotation mentale, $F(1,73) = 1.047$, $p = .310$. Nous n'avons également pas observé d'interaction entre ces deux variables, $F(3,73) = .670$, $p = .570$.

Nous avons également demandé aux participants leur niveau d'utilisation des stratégies consistant à compter les cubes de la figure, à comparer les couleurs des cubes ou à mettre en œuvre une autre stratégie. Le même type d'analyse que les précédentes n'a conduit à aucun effet principal de la modalité d'interaction, ni d'effet des habiletés visuo-spatiales. Aucune interaction significative entre les deux variables n'a été observée :

- Pour la stratégie comptage des cubes : $F(3,73) = .836$, $p = .479$, pour l'effet du groupe et $F(1,73) = 2.951$, $p = .091$, pour celui des habiletés visuo-spatiales et $F(3,73) = 1.564$, $p = .207$, pour l'interaction.
- Pour la stratégie comparaison des couleurs : $F(3,73) = .352$, $p = .788$ pour l'effet du groupe et $F(1,73) = 3.597$, $p = .062$, pour celui des habiletés visuo-spatiales et $F(3,73) = .510$, $p = .677$, pour l'interaction.
- Pour une autre stratégie : $F(3,73) = .365$, $p = .779$ pour l'effet du groupe et $F(1,73) = .345$, $p = .559$, pour celui des habiletés visuo-spatiales et $F(3,73) = .488$, $p = .692$, pour l'interaction.

Enfin, concernant les trois groupes avec interaction sur l'objet, une stratégie auto-rapportée indiquant le niveau d'utilisation de la rotation de l'objet a été évaluée. A l'aide d'une analyse similaire aux précédentes nous n'avons pas obtenu d'effet principal de la modalité d'interaction, $F(2,52) = 1.047$, $p = .359$. Nous avons en revanche observé un effet

principal des habiletés visuo-spatiales, les participants ayant de faibles habiletés visuo-spatiales rapportant une utilisation accrue de la rotation réelle, $F(1,52) = 5.898$, $p = .019$, $\eta^2_{\text{partial}} = .111$ (cf. Figure 19). Ces résultats sont concordants avec ceux évoqués précédemment et rapportant le niveau de rotation mentale utilisé. Nous n'avons pas obtenu d'effet d'interaction entre ces deux variables, $F(2,52) = .625$, $p = .540$.

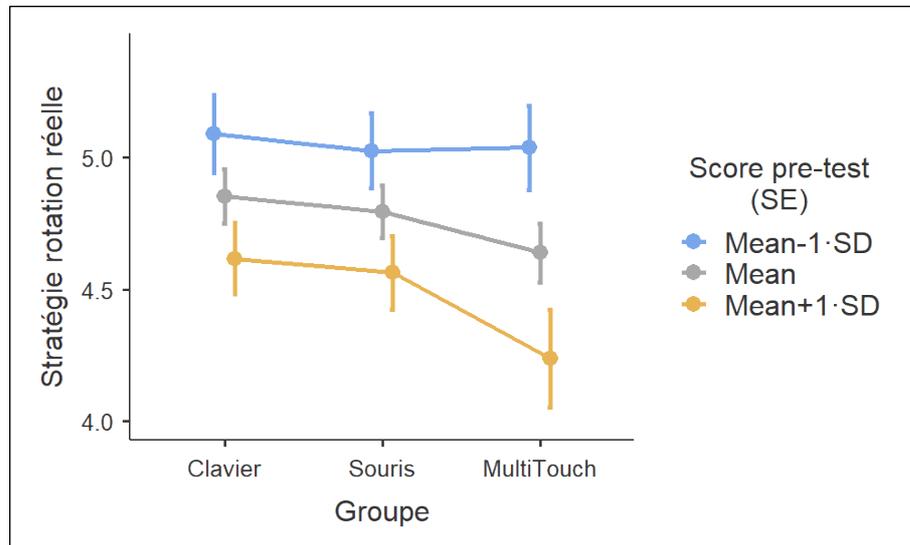


Figure 19 : niveau de rotation réelle de l'objet évoqué pour les groupes avec interaction.

4.6.4 Expérience utilisateur

Concernant l'expérience utilisateur deux questions étaient posées concernant la rotation de l'objet (automatique ou manuelle). La première évaluait la perception de la facilité de la tâche liée à la mise en rotation de l'objet. Elle consistait à savoir si cette rotation rendait donc la réalisation de la tâche plus facile. Pour analyser les réponses des participants nous avons, là encore, mené une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Cette analyse a montré un effet principal du groupe sur l'aide de la rotation selon la nature de l'interaction, $F(3,70) = 30.07$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{partial}} = .577$. Un test de comparaisons multiples (Bonferroni) a montré que la différence se situait toujours entre la modalité automatique ($M = 3.50$, $E.T. = 1.50$) et les modalités clavier ($M = 5.78$, $E.T. = .548$), souris ($M = 5.65$, $E.T. = .671$) et Multitouch ($M = 5.69$, $E.T. = .602$), $p < .001$ dans les trois cas. Il n'y a aucune différence significative entre les réponses apportées par les participants des trois groupes pouvant mettre en rotation l'objet. (cf. Figure 20)

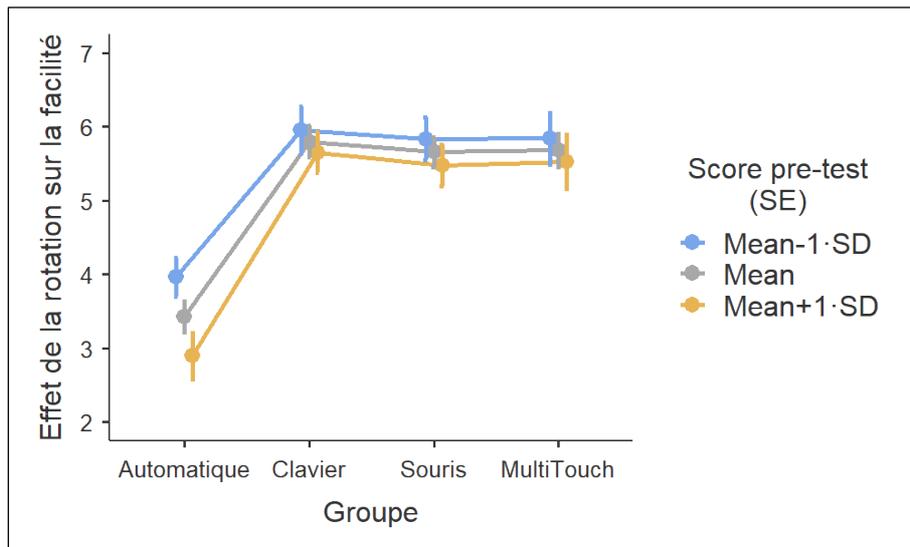


Figure 20 : Effet perçu de la rotation sur la facilité de la tâche.

Un effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales a également été obtenu, $F(1,73) = 5.208$, $p = .026$, $\eta^2_{\text{partial}} = .073$, mais nous n'avons pas obtenu d'effet d'interaction entre ces deux variables, $F(3,73) = .806$, $p = .495$. Les utilisateurs ayant de faibles habiletés visuo-spatiales perçoivent plus la rotation de l'objet dans l'interface comme une aide que ceux qui ont de fortes habiletés visuo-spatiales quelle que soit la modalité d'interaction.

La deuxième question consistait à savoir si les participants pensaient répondre plus rapidement grâce à la rotation de l'objet mobile (i.e. perception de l'utilité de la fonction de rotation). Là encore, une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle) a été conduite. Les résultats ont montré un effet principal du type d'interaction, $F(3,70) = 11.0278$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{partial}} = .334$. Un test de comparaisons multiples (Bonferroni) a montré que la différence se situait, comme pour les tests précédents, entre la modalité automatique ($M = 3.40$, $E.T. = 1.43$) et les modalités clavier ($M = 4.94$, $E.T. = 1.16$), souris ($M = 5.05$, $E.T. = .826$) et Multitouch ($M = 5.38$, $E.T. = .957$), $p < .001$ dans les trois cas. Il n'y a aucune différence significative entre les réponses apportées par les participants des trois groupes pouvant mettre en rotation l'objet (cf. Figure 21).

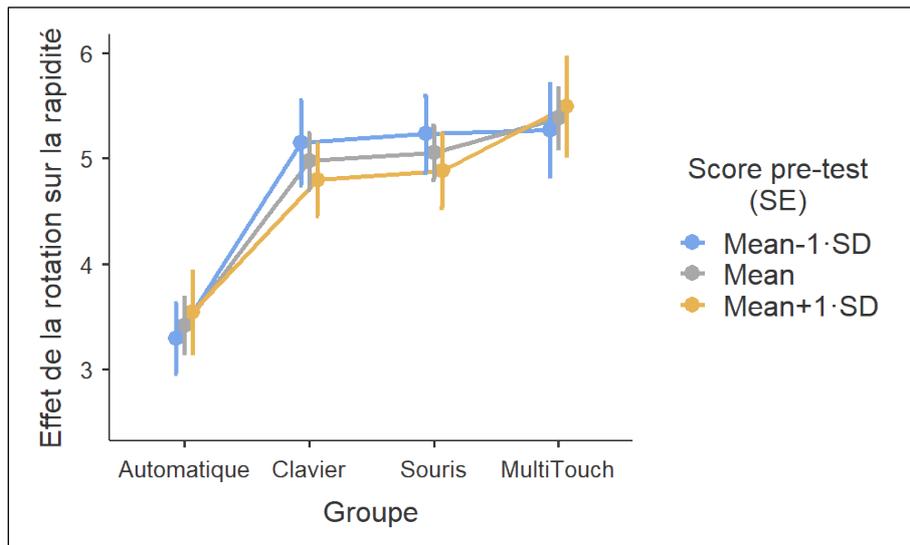


Figure 21 : influence perçue de la rotation sur la rapidité de réponse.

Par contre, nous n'avons pas obtenu d'effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales sur le recours à la rotation mentale, $F(1,73) = .042$, $p = .837$. Nous n'avons également pas obtenu d'effet d'interaction entre ces deux variables, $F(3,73) = .392$, $p = .759$.

4.6.5 Évolution des scores d'habiletés visuo-spatiales

Afin d'évaluer si l'exercice pratiqué a pu servir à améliorer les habiletés visuo-spatiales des participants, une ANOVA mixte a été conduite avec le moment du test de performance comme variable intra-sujets (i.e. pré-test et post-test) et la condition d'interaction comme variable inter-sujets. L'analyse montre un effet bénéfique de la tâche d'entraînement concernant le développement des habiletés en rotation mentale, $F(1,70) = 77.17$, $p < .001$, $\eta^2_{\text{partial}} = .41$ (cf. fig 22). Aucun effet principal du type d'interaction n'a été observé, $F(3,70) = 0.193$, $p = .901$.

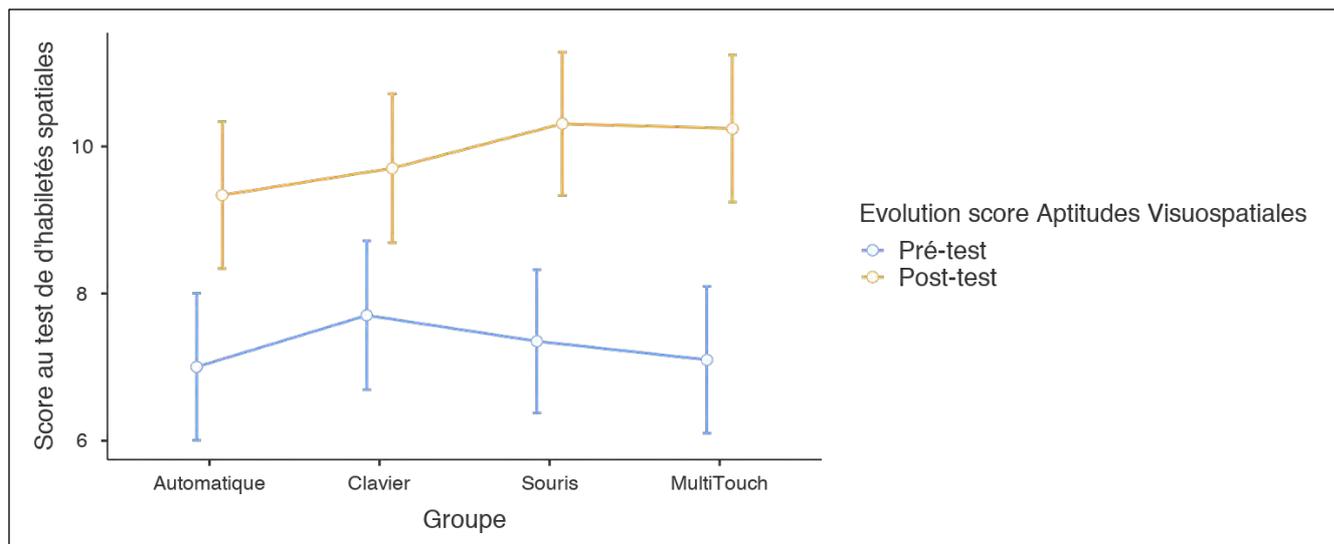


Figure 22 : Scores au pré-test et post-test sur les habiletés visuo-spatiales.

4.7 Discussion

L'objectif de cette première étude était de rechercher les effets d'une interaction utilisateur dans une tâche spatiale de rotation d'un objet 3D et de comparer diverses modalités entre elles. La prédominance de la réalisation d'un geste iconique sur une interface Multitouch par rapport à des modalités plus classiques (souris, clavier) était notamment recherchée. Enfin, l'objectif était également de voir si une meilleure réalisation de cette tâche entraînait un développement des habiletés visuo-spatiales en rotation mentale des participants.

Tout d'abord, nous avons pu reproduire dans cette expérience des résultats consistants dans la littérature concernant les bénéfices de l'utilisation des jeux vidéo 3D sur les habiletés visuo-spatiales.

Notre première hypothèse portait sur le niveau d'interaction entre l'utilisateur et l'objet. Les résultats obtenus confirment nos hypothèses concernant le score de la tâche de comparaison. Ce dernier est plus faible pour le groupe à rotation automatique que pour les trois autres modalités ce qui confirme la difficulté accrue de la tâche dans la condition automatique. Est-ce dû à un recours accru à la rotation mentale ? L'absence d'interaction sur l'objet devait impliquer une utilisation accrue de la rotation mentale selon nos hypothèses. Cela a été confirmé par les participants qui ont déclaré plus utiliser la rotation mentale dans le groupe où l'objet était en rotation automatique. Ces dires sont confirmés par la mesure de disparité angulaire au moment de la réponse bien plus importante dans ce groupe que pour les groupes pouvant orienter l'objet dans l'espace : pour ces derniers la réponse se fait après une orientation de l'objet à discriminer bien plus proche que celle de l'objet initial. Néanmoins, ce dernier résultat doit être relativisé car la position de l'angle de la figure était calculée lors de

la réponse du participant, or dans la condition automatique, la figure continue à tourner entre le moment de prise de décision et l'action du bouton de réponse. Cette utilisation plus importante de la rotation mentale dans le groupe sans interaction a d'ailleurs été ressentie comme un frein par les participants qui ont considéré que cela augmentait leur temps de réponse et rendait la tâche plus difficile. Ce ressenti subjectif sur la durée de réponse n'est cependant pas corroboré par les mesures objectives de temps de réponse moyen des participants des différents groupes. Enfin, cette difficulté à réaliser la tâche d'entraînement sans interaction n'implique pas une progression plus grande ou moins grande des habiletés visuo-spatiales des participants de ce groupe.

Notre deuxième hypothèse portait sur la nature du geste produit. Nous attendions un bénéfice du geste Multitouch réalisé directement sur l'objet et dont l'un des gestes était un geste iconique similaire au geste réel qui serait réalisé sur un objet. Cette interaction directe avec un geste qui aurait pu permettre un encodage plus précis de la scène pour l'utilisateur aurait dû être bénéfique aux personnes présentant de faibles habiletés visuo-spatiales. Contrairement à ce que nous espérions, nous n'avons pas pu mettre en évidence un bénéfice de ce geste Multitouch, ni sur la manipulation d'objets 3D ni sur le développement des habiletés visuo-spatiales des participants.

Quelles peuvent en être les causes ?

Une première piste concerne les gestes Multitouch implémentés dans l'interface. Il était possible d'utiliser trois gestes correspondant aux rotations dans les trois plans de l'espace. Cependant, un seul de ces gestes était un geste de rotation et il permettait la rotation autour d'un seul axe de rotation. Les deux autres gestes étaient des gestes de translation similaires à ceux réalisés sur la souris. Il est donc possible que la réalisation de ce seul geste de rotation, limité en amplitude, n'ait pas été suffisant pour apporter plus d'informations en mémoire de travail qu'avec les autres modalités.

Une deuxième piste concerne la facilité de la tâche d'entraînement lorsque l'interaction était possible. Les scores sur ces trois modalités sont autour de 30/36. Dès lors, vu que toutes les modalités d'interaction permettaient de réaliser correctement la tâche dans le même temps, un bénéfice du geste sur cette tâche ne nécessitant pas l'acquisition de concepts devient plus incertaine.

Notre troisième hypothèse portait sur l'influence des habiletés visuo-spatiales dans le type de stratégies mises en œuvre pour réaliser la tâche proposée. Nous attendions que les participants ayant de faibles habiletés visuo-spatiales mettent en œuvre d'autres stratégies que

la rotation mentale comme la comparaison des couleurs des cubes ou le comptage de ces derniers. Cela n'a pas été le cas. Les participants ont plutôt choisi de faire tourner l'objet en interagissant avec lui dans l'interface. Encore fallait-il que cette possibilité leur soit offerte, ce qui n'était pas le cas dans la modalité de rotation automatique. Cela permet d'expliquer l'interaction obtenue entre la modalité d'interaction et le niveau d'habiletés visuo-spatiales. Nous avons montré dans les résultats que cette dernière était due au groupe automatique. Les participants de ce groupe n'ont pas pu utiliser la rotation réelle comme dans les autres groupes et n'ont pas mis en œuvre plus de stratégies complémentaires. Les participants ayant de faibles habiletés visuo-spatiales ont donc obtenu de moins bons résultats à la tâche.

Notre dernière hypothèse portait sur les bénéfices de l'entraînement à la rotation réelle sur la rotation mentale. Nous attendions que la réalisation de cette tâche améliore les scores des participants au post-test et nous attendions une amélioration plus importante pour la modalité Multitouch. Nos résultats montrent en effet, que l'utilisateur puisse interagir avec l'objet en le faisant tourner ou que la rotation soit automatique, une augmentation significative des scores aux tests d'habiletés visuo-spatiales avant et après la tâche de rotation réelle. L'entraînement sur des tâches de rotation réelle fait bien progresser le niveau d'habiletés en rotation mentale. Cependant et contrairement à nos attentes cette progression n'est pas liée à la nature du geste réalisé lors de l'entraînement. Par contre, nous avons montré que l'interaction avec l'objet et donc indirectement le geste produit pouvait être une sorte de modérateur des habiletés visuo-spatiales : en l'absence d'interaction les habiletés visuo-spatiales expliquent une partie de la variance des résultats obtenus à la phase d'entraînement, ce qui n'est pas le cas lorsque l'utilisateur contrôle le mouvement de l'objet via une interaction. Ce lien entre le geste et les habiletés visuo-spatiales devra donc être recherché dans la suite de ce travail.

Au final, nous avons dans cette expérience, davantage mis en évidence l'effet bénéfique du contrôle du mouvement d'un objet par rapport à une situation d'observation d'un même type de mouvement. Nous n'avons pas pu mettre en évidence de bénéfices de la production d'un geste Multitouch par rapport à la réalisation de gestes plus classiques comme des mouvements de souris ou l'utilisation d'un clavier. Pour poursuivre cette étude nous avons donc décidé de rechercher un effet du geste Multitouch dans une tâche réelle d'apprentissage. Pour cela, l'étude suivante portait sur une tâche nécessitant la conceptualisation d'un phénomène en sciences et utilisant un geste congruent avec la tâche comme dans l'étude de Segal, Tversky et Black (2014). L'objectif d'apprentissage de cette

étude était la compréhension de mouvements dans le champ de pesanteur terrestre à l'aide d'une simulation.

Chapitre 5 : Effet du geste sur la compréhension de mouvements dans le champ de pesanteur terrestre.³

Dans l'expérience précédente il n'a pas été possible de mettre en évidence la plus-value d'un geste réalisé sur une tablette Multitouch dans la réalisation d'une tâche spatiale de rotation 3D d'un objet. Une des pistes retenues pour expliquer l'absence de plus-value de la production de gestes était que parmi les trois gestes à réaliser pour faire tourner l'objet autour de ses trois axes de rotation, un seul des gestes Multitouch était réellement un geste de rotation. L'information signifiante liée à la tâche et potentiellement encodée par le geste était donc très faible.

Dans cette deuxième expérience, nous avons donc prolongé l'expérience précédente mais en utilisant cette fois :

- Un protocole ne nécessitant pas l'utilisation de gestes non signifiants avec la tâche à étudier.
- Une tâche de compréhension d'un concept physique et non une simple tâche de réalisation d'une action. Il s'agit donc d'une tâche similaire à celles réalisées en classe. Le domaine d'étude portait sur l'étude des mouvements de projectiles dans le champ de pesanteur terrestre.

Nous avons de plus dans l'expérience précédente mis en évidence les bénéfices d'une mise en activité avec interaction sur l'objet à manipuler par rapport à une situation plus passive avec l'observation d'une rotation automatique de l'objet. Nous avons donc ici essayé de voir si ce résultat était transposable à une tâche d'apprentissage de concepts en prenant comme groupe témoin des utilisateurs pouvant seulement regarder une vidéo pour réaliser les activités proposées. Les participants du groupe expérimental devaient par contre utiliser un simulateur sur la tablette et un logiciel de dessin avec des gestes signifiants pour reconstituer des trajectoires de projectiles.

Cette étude portant sur la compréhension des trajectoires de projectiles dans le champ de pesanteur en fonction des conditions initiales (valeur et orientation de la vitesse, altitude de départ). Nous allons, dans la partie suivante, faire un état des lieux des difficultés rencontrées par les étudiants lors de l'étude de ce phénomène. Nous verrons également quel est l'état des

³ Ce travail a fait l'objet d'une communication au workshop international « *Language Didactics, Gestures and CALL* » à Toulouse (2017)

lieux des résultats de recherche sur les bénéfices de l'utilisation d'un simulateur dans ce domaine.

5.1 Difficultés rencontrées par les étudiants lors de l'analyse de mouvements d'objets dans le champ de pesanteur

5.1.1 Les conceptions erronées en Mécanique :

L'observation de mouvements simples d'objets par des élèves ne permet pas forcément de comprendre les concepts basiques de mécanique qui sous-tendent ces mouvements. Ou du moins, les étudiants ne font pas spontanément appel à ces concepts mais font plutôt appel à des croyances basées sur leurs expériences personnelles pour interpréter les mouvements observés ou inférer des mouvements. Ce phénomène que tout enseignant de physique a pu observer dans sa classe a été étudié par Caramazza, McCloskey et Green (1981) en questionnant 44 étudiants, dont 30 avaient suivi des cours de physique durant leur cursus. Cette étude portait sur la trajectoire d'un projectile constitué par la masse d'un pendule simple (bille métallique) dont on coupe le fil à une position donnée lors de ses oscillations successives. Les participants devaient dessiner l'allure des trajectoires du projectile une fois le fil coupé.

Leurs résultats montrent que seulement 25% des étudiants ont une compréhension correcte des phénomènes physiques sous-jacents à l'allure de la trajectoire de l'objet, même si l'influence de paramètres comme la vitesse initiale sur la portée de la trajectoire n'est pas acquise par tous. Cependant ces étudiants n'ont pas d'idées erronées grossières sur l'allure de la trajectoire de l'objet étudié contrairement à 75% des autres étudiants. Les auteurs ont d'ailleurs classé les étudiants en sept types selon la nature des conceptions erronées présentes chez chacun des étudiants (les étudiants de type I étant ceux ayant une bonne compréhension des phénomènes physiques mis en jeu) (cf. Figure 23).

A l'opposé du Type I se trouvent quelques étudiants (Type VI) ayant de fortes conceptions erronées en mécanique. Leurs représentations semblent en accord avec une théorie élaborée par Jean Buridan au XIV^{ème} siècle et enseignée alors à l'université de Paris. Selon cette théorie, mise ensuite à mal par la physique de Galilée, un objet mis en mouvement se voit doté d'un impetus qui entretient son mouvement. Cependant cet impetus décroît avec les frottements de l'air et lorsque cet impetus disparaît, l'objet tombe verticalement. Il est à noter que 5 des étudiants de ce type sur six n'avaient pas suivi de cours de physique dans leur

curus, preuve de l'importance des connaissances antérieures dans un domaine sur la compréhension des phénomènes étudiés.

Malgré tout, seulement 70% des étudiants ayant suivi des études de physique dans leur cursus ont produit des bonnes réponses ou du moins ont commis des erreurs non basées sur des croyances n'ayant aucun fondement physique. Il est donc manifeste que ces notions sont difficiles d'accès pour les étudiants et comme le rappellent Jimoyiannis et Komis (2001), un enseignement traditionnel peine à contrecarrer ces conceptions erronées. Il semble en particulier qu'il est difficile pour les étudiants de comprendre l'influence de la vitesse initiale sur le mouvement de chute libre dans le champ de pesanteur. L'objectif de cette étude, dans une approche incarnée de la cognition, sera donc d'essayer d'ancrer dans le système moteur des apprenants, en utilisant les gestes Multitouch, les trajectoires d'objets dans le champ de pesanteur.

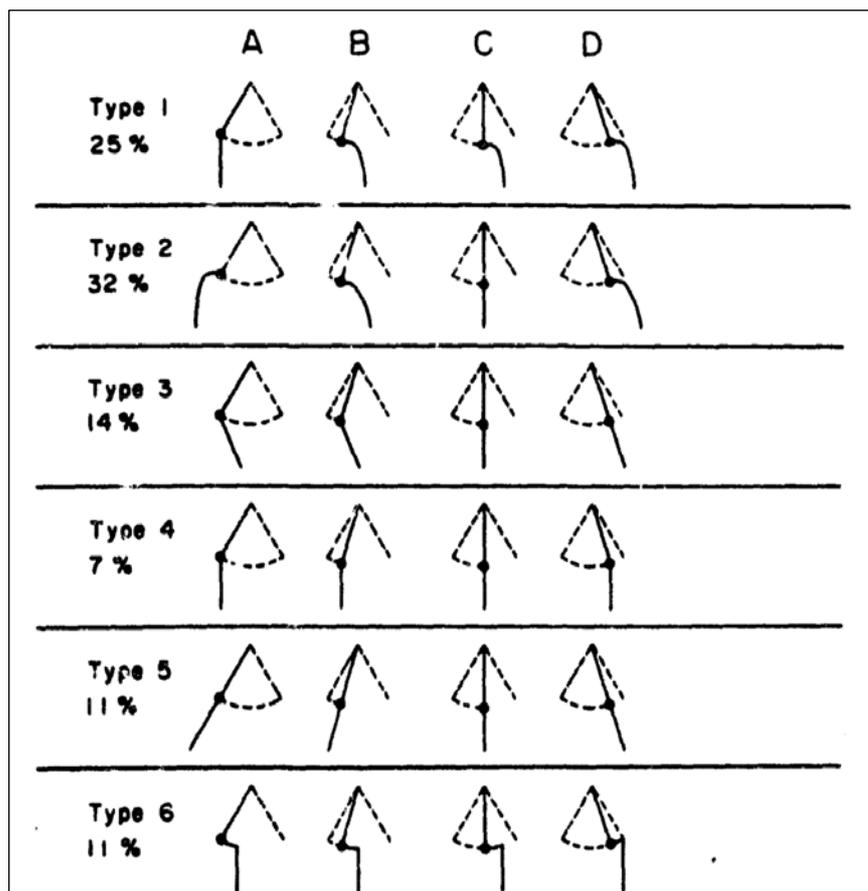


Figure 23 : classement des étudiants en fonction des types de conceptions erronées chez les participants.

5.1.2 Difficulté d'interprétation des représentations graphiques utilisées :

Aux difficultés amenées par les conceptions naïves des apprenants viennent se superposer des difficultés à exploiter les représentations graphiques utilisées pour représenter l'évolution temporelle ou spatiale des grandeurs lors de l'étude de trajectoires d'objet. Deux types de difficultés pour exploiter des représentations graphiques indépendamment des habiletés mathématiques nécessaires à la simple interprétation d'un graphique ont été relevées par McDermott, Rosenquist et Zee (1987) :

- Difficulté à faire le lien entre une représentation graphique et le sujet qu'elle représente : Exemple : Déterminer quelle voiture à la plus grande vitesse à la date $t=2s$ à partir des graphes A et B : difficulté à choisir la grandeur pertinente (pente de la droite ou valeur du point). (cf : Fig 24)
- Difficulté à faire le lien entre représentation graphique et monde réel et donc des difficultés à tracer l'évolution d'une grandeur en fonction du temps en observant l'évolution spatiale du mouvement d'une bille.

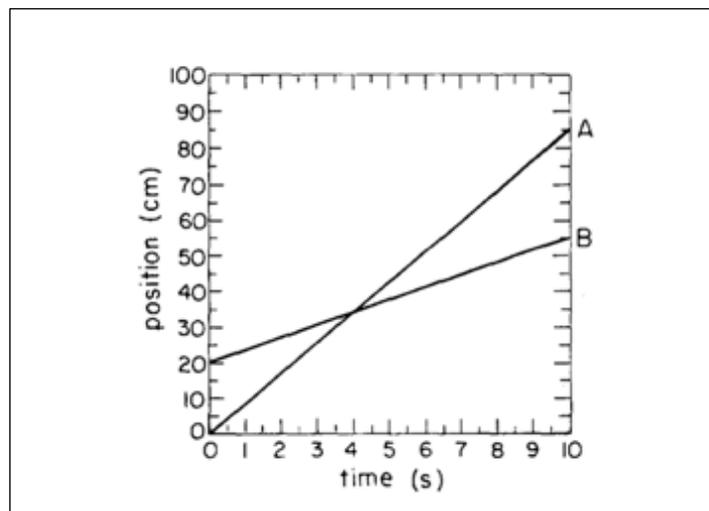


Figure 24 : Exemple de difficulté en mécanique (McDermott, Rosenquist, & Zee 1987)

Pour pallier à ces difficultés, Moore, Baker, Franzel, McMahon et Songer (2010) ont proposé une méthode graphique non trigonométrique et utilisant le moins de mathématiques possible pour déterminer la trajectoire d'un objet dans le champs de pesanteur. Elle est basée sur la décomposition du mouvement en deux types de mouvement (cf. Figure 25)

- Un mouvement rectiligne uniforme correspondant à la conséquence de la vitesse initiale dans le cas où aucune force ne s'applique à l'objet étudié.
- Un mouvement de chute verticale liée à l'action de la pesanteur sur l'objet étudié.

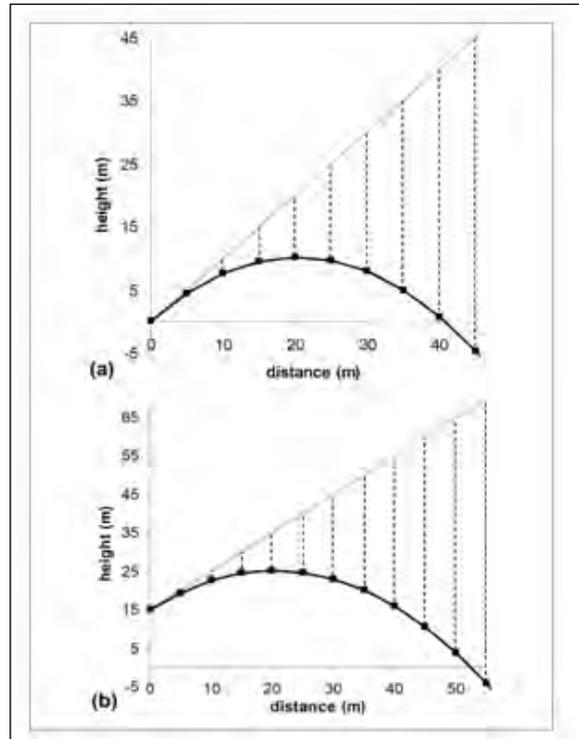


Figure 25 : Méthode graphique pour déterminer la trajectoire d'un projectile. Tiré de (Moore, Baker, Franzel, McMahon, & Songer, 2010)

C'est cette méthode d'apprentissage qui a été choisie dans cette étude, pour tenter de faire comprendre les trajectoires d'un objet en mouvement dans le champ de pesanteur terrestre. Pour cela deux types d'actions motrices seront proposées aux utilisateurs :

- La production d'un geste vertical sur la tablette correspondant à la distance verticale de chute pour différentes positions de l'objet à partir de la droite représentant l'évolution théorique en l'absence de pesanteur terrestre. La trajectoire réelle de l'objet étant une composition de ce mouvement avec un mouvement rectiligne horizontal, ce geste ne décrit pas à proprement parler le mouvement observé de l'objet. Nous pouvons donc considérer ce geste comme un geste métaphorique.
- La production d'un geste parabolique correspondant à la trajectoire de l'objet dans le champ de pesanteur résultant de la construction précédente. Ce geste lui sera donc un geste iconique de type *observer viewpoint* (Goldin-Meadow & Beilock, 2010 ; Parrill, 2010).

La combinaison de ces deux gestes, un iconique et un métaphorique visent à faciliter l'encodage en mémoire de travail de la représentation parabolique du mouvement.

Afin d'aider les participants à mieux appréhender le fait que la trajectoire parabolique obtenue dans le cas du lancement d'un projectile lancé avec une vitesse initiale non nulle est bien une composition des deux mouvements précédents, ces deux types de geste seront introduits dans cette expérience en utilisant un simulateur de trajectoires de projectiles. Recomposer une trajectoire, en recomposant des positions différentes au cours du temps de l'objet dans l'espace, mettra donc en jeu des habiletés visuo-spatiales de type extrinsèque et dynamique dans la classification de Newcombe et Shipley (2015).

Un simulateur étant la base du matériel de cette étude pour l'étude des mouvements, nous allons dans la prochaine partie regarder l'influence des simulateurs sur la compréhension des mouvements d'objets.

5.2 L'utilisation de simulateurs numériques ou de jeux vidéo comme aide à la compréhension des mouvements d'objets.

Jimoyiannis et Komis (2001) ont pu montrer que l'utilisation d'un simulateur informatique, *Interactive Physics*, en accompagnement d'un enseignement traditionnel, permettait de lever certaines conceptions erronées chez les étudiants et apportait de meilleures compréhensions des trajectoires d'objets en mouvement que lors d'un enseignement traditionnel seul. Dans cette étude, un groupe d'étudiant disposait de deux séances d'utilisation du simulateur :

- Une séance, guidée par un enseignant, pour étudier les lois de la chute libre.
- Une séance plus exploratoire qui permettait aux étudiants de faire varier les paramètres physiques entrant en jeu dans la simulation et d'observer les conséquences de ces variations.

Une analyse par questionnaire portant sur les conceptions erronées classiquement rencontrées en mécanique a montré que ces dernières se retrouvaient de manière prédominante dans le groupe contrôle. Selon les auteurs, le fait de pouvoir suivre en temps réel l'évolution de la trajectoire de l'objet et de voir simultanément se tracer l'évolution temporelle graphique des grandeurs physiques utiles à la compréhension du mouvement, aurait permis aux étudiants du groupe testé de mieux conceptualiser les phénomènes étudiés. Concernant cette étude nous devons cependant noter que :

- Les effectifs des groupes tests et contrôle ne sont pas de même taille (30 participants pour le groupe test et 60 pour le groupe contrôle).
- Les conceptions n'ont été testées qu'une fois pour les deux groupes, après l'utilisation du simulateur. On peut donc se poser la question de savoir si la différence constatée n'était pas déjà présente avant l'utilisation du simulateur. Enfin, si ce n'était pas le cas, est-ce l'utilisation du simulateur ou le fait de rajouter des activités d'enseignement (dont une guidée par un enseignant) qui permet de faire diminuer les mauvaises conceptions des élèves.

Concernant les difficultés à interpréter les graphiques, une étude menée par Araujo, Veit, et Moreira (2008) a testé l'efficacité de l'utilisation d'un simulateur, *Modellus*. Là encore, l'utilisation d'une activité numérique en complément d'une activité traditionnelle a donné de meilleurs résultats que lors d'un enseignement seul. De plus, les auteurs notent une motivation accrue des apprenants, liée à la compréhension du lien entre représentation mathématique et grandeur physique associée, modélisée lors de la réalisation de ces activités. On peut cependant se demander si les bénéfices observés sont dus à la présence du simulateur ou au surplus d'activités réalisées par le groupe expérimental par rapport au groupe contrôle.

L'expérience réalisée par Masson, Bub, et Lalonde (2011) nous semble répondre aux quelques questions précédentes. Dans leur étude, un groupe d'étudiants a été soumis à une utilisation intensive d'un jeu vidéo test mettant en scène des trajectoires réalistes d'un point de vue physique d'objets. Dans le même temps, le groupe contrôle jouait à un jeu de stratégie. Les auteurs ont noté une progression de l'aptitude à représenter la trajectoire d'un objet en mouvement seulement pour le groupe ayant joué au jeu vidéo incorporant des trajectoires. Mais ils ont constaté que les habiletés acquises étaient superficielles et ne concernaient que l'allure des trajectoires. Les effets de l'angle de départ par exemple sur la forme de la trajectoire demeuraient inaccessibles aux participants. Le deuxième point très intéressant de cette étude est que les auteurs ont soumis les étudiants des deux groupes à un cours de physique de 30 minutes sur les lois de la mécanique newtonienne. Ce dernier a montré une efficacité double sur les apprentissages des élèves comparé aux six heures d'exposition de jeu vidéo. De plus, les participants du groupe jeu vidéo test n'ont montré aucune supériorité dans ce deuxième test, preuve de l'absence de transfert des connaissances superficielles acquises lors du jeu.

5.3 Le feedback visuel lors de la production de gestes sur la tablette.

Comme le précisent Anthony, Brown, Nias et Tate (2013) dans leur étude, une rétroaction visuelle est bénéfique dans la production de gestes réalisés sur une interface tactile. En l'absence de ce retour visuel, la diversité des gestes produits les rend difficilement interprétables. Cela est surtout vrai chez les jeunes enfants, mais aussi chez les adultes. Dans cette étude, afin d'éviter d'ancrer chez les utilisateurs, des représentations erronées dues à des actions de traçage peu précises, il a été décidé d'utiliser un logiciel de dessin afin que l'utilisateur puisse observer le tracé de son mouvement sur la surface de la tablette pour les deux types de constructions évoquées précédemment.

5.4 Hypothèses

Dans le paragraphe précédent nous avons vu que le fait d'observer des allures de trajectoires amenait bien à un apprentissage de ces dernières. Cependant, cet apprentissage était superficiel et non transférable dans des situations d'études similaires. Dans la manipulation précédente nous avons de plus montré l'intérêt d'une interaction dans la réalisation d'une tâche spatiale pour l'utilisateur. Nous allons donc, ici, essayer de déterminer si le fait de réaliser des gestes lors de l'analyse de mouvements peut amener à un encodage d'informations supplémentaires. Ce surplus d'informations permettrait de dépasser le caractère superficiel de l'apprentissage effectué, et donc de rechercher un apport de ces actions motrices dans la conceptualisation du phénomène observé. Nous nous sommes donc placés dans cette expérience dans la perspective d'une action incarnée porteuse d'informations en mémoire de travail. Pour que ce phénomène soit efficace il semble donc nécessaire que l'apport d'informations réalisé par le geste soit suffisamment important pour que l'apprenant construise un modèle pertinent de la situation en mémoire de travail. Autrement dit, il est nécessaire de mobiliser des gestes iconiques représentant l'allure des trajectoires d'une part pour appréhender l'allure des trajectoires, mais également des gestes métaphoriques permettant d'appréhender le phénomène sous-jacent qui amène à ces allures de trajectoire. Ce faisant, la production de gestes sur la tablette devrait favoriser l'encodage en mémoire de travail des informations pertinentes à la compréhension des trajectoires de projectiles dans le champ de pesanteur terrestre. Ces considérations nous amènent donc à faire les deux hypothèses suivantes :

- Hypothèse 1 : Comparativement à une situation impliquant une simple observation de tracés de trajectoire d'un objet dans l'espace, l'utilisation d'un geste iconique Multitouch devrait permettre de mieux appréhender l'allure des trajectoires de projectile dans le champ de pesanteur terrestre.

- Hypothèse 2 : Une compréhension accrue des phénomènes sous-jacents à l'allure de ces trajectoires est attendue grâce à la réalisation d'un geste métaphorique représentant la perte d'altitude du projectile au cours du temps. En effet, l'utilisation de tracés au doigt sur un logiciel de dessin de la chute verticale à chaque position, devrait permettre d'appréhender l'allure de la trajectoire comme la composition de deux mouvements.
- Hypothèse 3 : Comparativement à une situation impliquant une simple observation de tracés de trajectoire d'un objet dans l'espace, l'utilisation d'un simulateur couplé au retour visuel direct de l'action sur la tablette avec l'interface Multitouch devrait être plus bénéfiques pour les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales comme l'ont montré Kozhevnikov et Thornton (2006) et Anthony, Brown, Nias et Tate (2013).

5.5 Méthodologie

5.5.1 Participants

61 élèves de première S (30 filles et 31 garçons) d'âge compris entre 14 et 17 ans (moyenne = 16 ans, écart-type = 0.3 ans) et provenant de trois classes d'un lycée d'enseignement général ont participé à cette étude. La fréquence d'utilisation de jeux vidéo 2D et 3D a été évaluée. Les participants ont également été pré-testés sur le niveau de connaissances antérieures sur le sujet étudié ainsi que sur leurs habiletés visuo-spatiales en rotation mentale. A partir de ces résultats deux groupes identiques (validation par test de Student pour échantillons indépendants) concernant ces points ont été constitués :

- Le groupe expérimental (n=32) avec production de gestes sur la tablette. Dans la suite ce groupe sera appelé groupe « gestes ».
- Le groupe contrôle (n=29) avec visionnage seul d'une vidéo. Dans la suite ce groupe sera appelé groupe « observations ».

5.5.2 Matériel

5.5.2.1 Matériel et tâche d'apprentissage

Pour les deux groupes, les utilisateurs disposaient d'iPad 2 avec écran de 10 pouces pour réaliser les activités demandées.

Deux types de ressources ont été proposées aux utilisateurs :

- Une vidéo de cours a été proposée aux utilisateurs des deux groupes. Elle prenait appui sur un enregistrement d'écran d'un simulateur disponible sur iPad : « *Equations*

of Motion », simulateur utilisé réellement par le groupe gestes. Une première partie présentait le mouvement de chute libre verticale d'un boulet de canon lâché depuis une grue et expliquait l'allure de la trajectoire obtenue. Les équations horaires du mouvement étaient aussi présentées. Une deuxième partie donnait les mêmes explications pour le mouvement parabolique d'un obus de canon. Ce mouvement était décrit comme la composition d'un mouvement rectiligne uniforme et d'un mouvement de chute verticale vue précédemment. Cette vidéo pouvait être visionnée une seule fois par les participants du groupe gestes et plusieurs fois par les participants du groupe observations.

- Le groupe gestes disposait en plus du simulateur équation of Motion qui était utilisé dans la vidéo précédente. Les participants de ce groupe pouvaient donc simuler l'évolution de trajectoires d'objets en fonction des conditions initiales (vitesse initiale, angle de la vitesse initiale, hauteur initiale de l'objet) et d'observer également les courbes horaires du mouvement (position et vitesse) pour deux types de mouvements comme cela avait été montré dans la vidéo de cours :

- Le mouvement d'un boulet en chute verticale lâché depuis une grue.
- Le mouvement d'un obus lancé par un canon : mouvement parabolique dont l'allure dépend des conditions initiales choisies.

La figure 26 ci-dessous présente l'interface de lancement de la simulation à utiliser.

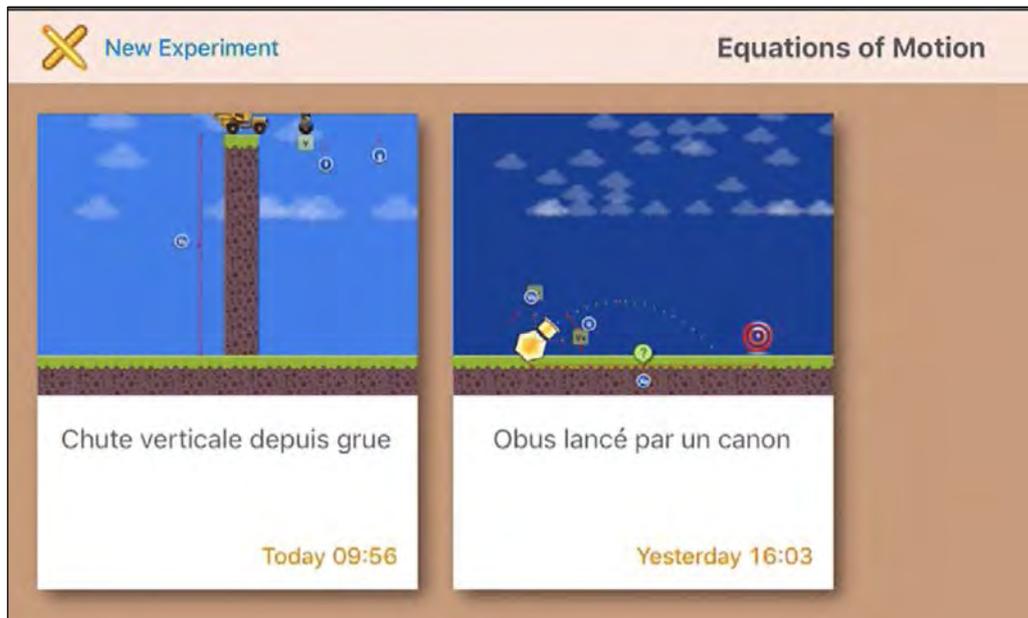


Figure 26 : Simulateur Equations of Motion : choix de la simulation

La figure 27 présente la simulation du mouvement de chute verticale en cours d'exécution. La partie gauche permet de suivre le mouvement de l'objet. Une barre de temps en bas de l'écran permet à l'utilisateur de mettre en pause la simulation, de l'avancer ou de la reculer. La partie en haut en droite de l'écran permet de fixer les paramètres de la simulation : hauteur de départ du boulet, valeur de l'intensité de la pesanteur... La partie en bas à droite de l'écran du simulateur présente les courbes de l'évolution des grandeurs au cours du temps (position et vitesse). Le tracé de ces courbes est synchronisé avec le mouvement de chute du boulet. Une fois le mouvement terminé, ces courbes peuvent être affichées en plein écran pour analyse.

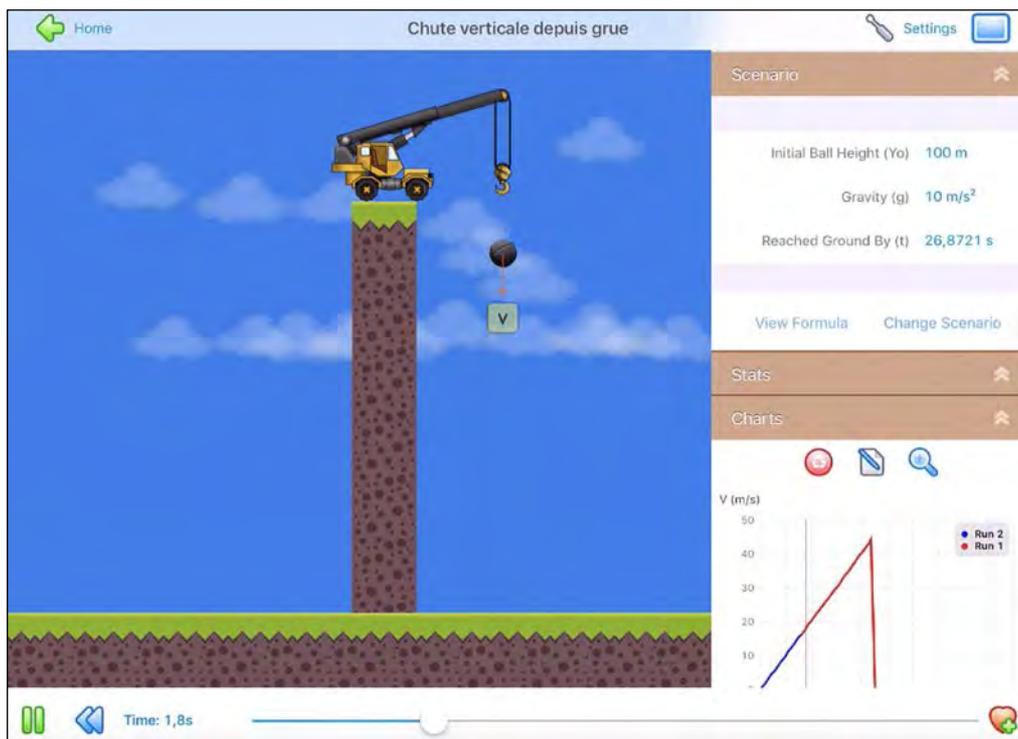


Figure 27 : simulateur de chute verticale.

- Qu'il s'agisse du groupe observation ou du groupe gestes, l'utilisation des supports précédents s'accompagnait de fiches activités, à compléter pour chacun des groupes, avec différentes questions sur les différents mouvements mis en œuvre sur le simulateur ou observés sur la vidéo. Les mouvements étudiés et questions posées étaient identiques pour les deux groupes. Seule la consigne différait : utiliser le simulateur ou la vidéo pour répondre aux questions pour les groupes tablettes et vidéo respectivement. Les questions posées portaient sur les mouvements des objets dans les conditions étudiées : par exemple, quelle est la distance parcourue par l'objet en 1s ou comment

évolue la vitesse v_y selon l'axe y ? L'ensemble des questions posées est disponible en annexe 2.

- Le groupe gestes devait de plus dessiner l'allure de trajectoires sur la tablette. Pour cela le logiciel Adobe Draw a été utilisé car il permettait de tracer des droites ou des courbes au doigt. Enfin, un calque transparent a été placé sur une image du simulateur correspondant à une situation problème similaire à une des actions simulées précédemment. (cf. Figure 28). Cette image présentait mouvement fictif qu'aurait eu un boulet de canon en l'absence de pesanteur. Les élèves disposaient de l'échelle et de la vitesse initiale du boulet. Ils devaient donc tracer chaque seconde, à partir de la trajectoire présente, un trait vertical correspondant à la chute verticale du boulet en présence du champ de pesanteur. Ce geste vertical correspond au geste métaphorique qui va permettre de comprendre l'origine de l'allure de la trajectoire parabolique. Les participants devaient ensuite relier au doigt les points les plus bas des traits verticaux précédents ce qui permettait de reconstituer la trajectoire réelle parabolique du boulet de canon. Ce deuxième geste correspondait au geste iconique représentant l'allure de la trajectoire.

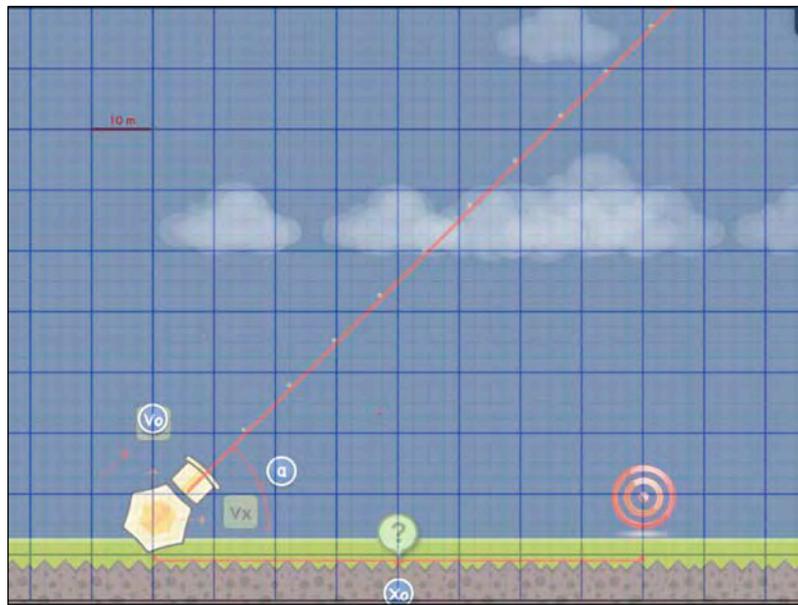


Figure 28 : Calque pour dessiner la trajectoire à l'aide d'Adobe Draw

5.5.2.2 Mesures des différences interindividuelles

Les habiletés visuo-spatiales ont été évaluées à partir d'une partie du test de Vandenberg et Kuse, (1978) étalonnée pour des lycéens français d'âge compris entre 15 et 19 ans par Albaret

et Aubert (1996). Ce test a été choisi car il est identique à celui utilisé dans l'expérience précédente. Il est disponible en annexe 1.

Les connaissances antérieures en mécanique ont été évaluées à l'aide d'un test élaboré à partir de questions sur les notions de vitesse et graphes horaires (Lichtenberger & Wagner, 2014), et de questions sur les conceptions en mécanique (Jimoyiannis & Komis, 2001; Caramazza, McCloskey, & Green, 1981). La figure 29 ci-dessous présente la première question de ce test. Les dix premières questions de ce test portaient spécifiquement sur la compréhension des trajectoires de projectiles. L'ensemble des questions est disponible en annexe 2.

Q1 :
Deux balles A et B sont lâchées d'une même altitude h . La balle B possède une masse double de la balle A. Les frottements de l'air sont négligeables.



La balle A va toucher le sol en premier.

La balle B va toucher le sol en premier.

Les balles A et B vont toucher le sol en même temps.

Je ne sais pas.

Figure 29 : Exemple de question du pré-test sur les connaissances antérieures en mécanique.

5.5.2.3 Mesures des performances d'apprentissage

Un post-test comportant 10 questions identiques à celles posées en pré-test et portant sur les trajectoires de projectiles dans le champ de pesanteur servait de mesure des performances d'apprentissage des participants.

5.5.2.4 Ressenti des participants sur l'utilisabilité de la tablette

Afin de contrôler le fait que l'introduction de l'activité sur le simulateur et sur le logiciel de dessin n'entraîne pas chez les utilisateurs une impression de difficulté de réalisation accrue et ne nuise à l'implication de ce dernier nous avons choisi d'évaluer l'utilisabilité perçue de la tablette pour les deux groupes. Pour évaluer ce ressenti des utilisateurs sur l'utilisabilité de la tablette pour réaliser ces activités nous avons posé un jeu de 5 questions aux participants des deux groupes :

Pour réaliser ces activités j'ai trouvé :

1 : que la tablette était facile à utiliser.

2 : qu'il était facile d'apprendre à utiliser la tablette.

3 : que l'on faisait peu d'erreurs en utilisant la tablette avec les applications proposées.

4 : que la tablette était pénible à utiliser.

5 : qu'utiliser la tablette me demandait beaucoup d'efforts.

Les deux dernières questions étaient négatives vis-à-vis de l'utilisabilité de la tablette afin de vérifier la cohérence des réponses des participants.

5.5.2.5 Stratégies de visionnage de la vidéo

A simple fin de contrôle, l'implication des participants du groupe observation dans l'activité d'apprentissage a été mesurée par un questionnaire recensant les stratégies mises en œuvre lors du visionnage de la vidéo (un ou plusieurs visionnages, en une seule fois ou par petits bouts ...). Ce questionnaire est disponible en annexe 2.

5.5.2.6 Ressenti des participants sur l'efficacité perçue de l'activité d'apprentissage

Une question était posée aux participants à la fin de l'activité pour évaluer leur sentiment sur l'efficacité de l'activité d'apprentissage qu'ils venaient de réaliser. Une échelle en six points allant de « Pas du tout d'accord » à « Tout à fait d'accord » accompagnait la question posée : « Suite aux activités proposées vous pensez être plus à même de comprendre le mouvement d'un objet dans le champ de pesanteur et selon les cas d'en déduire sa trajectoire ? »

5.5.3 Procédure

Une semaine avant le début de l'expérience les utilisateurs ont passé les tests permettant de constituer des groupes homogènes en fonction des critères évoqués plus haut : test des connaissances antérieures dans le domaine étudié suivi du test d'habiletés visuo-spatiales. L'expérience s'est ensuite déroulée sur une séance de 1h30 avec le découpage horaire suivant :

- 20 minutes : Les deux groupes ont regardé une fois la vidéo de cours, sans pause mais avec prise de notes possibles. La consigne qui était donnée aux participants était : « Vous devez regarder très attentivement la vidéo en une seule fois. Vous pouvez si vous le souhaitez prendre des notes, mais vous ne devez pas mettre en pause la vidéo lors de ce visionnage. » Il s'agissait ici pour tous les participants d'avoir une première explication détaillée des concepts à comprendre dans l'activité.
- 5 minutes : Le groupe expérimental (i.e. groupe « gestes ») découvrait le fonctionnement du simulateur afin de se familiariser avec l'interface alors que le groupe contrôle (i.e. groupe « observations ») regardait une vidéo de trajectoires à partir de captures vidéo réalisées à partir du jeu vidéo *Angry-Birds*. Cette tâche a été choisie pour ne pas détourner l'attention des participants du groupe « observations »

de la tâche étudiée tout en permettant de laisser le temps aux participants du groupe « gestes » de prendre en main le simulateur.

- 40 minutes : Chaque groupe réalisait les mêmes activités qui consistait à répondre à des questions sur les mouvements à partir de la feuille d'activité décrite dans la section matériel et disponible en annexe 2. Le groupe « gestes » devait utiliser le simulateur pour répondre aux questions, le groupe « observations » pouvait revoir la vidéo de cours pour répondre à ces questions. Le mode de visionnage de la vidéo (pause, retour en arrière ..) était libre. Il en était de même pour l'utilisation du simulateur.
- 15 min : Les participants devaient répondre aux questions concernant l'utilisabilité de la tablette et leur sentiment concernant la compréhension des phénomènes étudiés. Ils ont ensuite passé le post-test qui reprenait les dix questions liées à la trajectoire de projectiles dans le champ de pesanteur issues du pré-test.

5.6 Hypothèses opérationnelles :

- Hypothèse 1 : Il est attendu que les participants du groupe « gestes » fassent de meilleures prédictions qualitatives des trajectoires des objets en mouvement dans le champ de pesanteur lors du test post-activité que ceux du groupe « observations » grâce à l'utilisation des gestes de tracé iconiques mis en œuvre sur la tablette.
- Hypothèse 2 : Il est attendu que l'utilisation du geste Multitouch métaphorique pour reconstruire la trajectoire amène à une compréhension accrue des phénomènes sous-jacents à l'allure des trajectoires et donc à un meilleur score des participants du groupe « gestes » par rapport à ceux du groupe « observations » aux questions correspondantes, lors du test post activité. En effet, l'utilisation de tracés au doigt sur le logiciel de dessin de la chute verticale à chaque position, devrait permettre d'appréhender l'allure de la trajectoire comme la composition de deux mouvements.
- Hypothèse 3 : Il est attendu que l'utilisation d'un simulateur, couplé au retour visuel direct de l'action sur la tablette avec l'interface Multitouch, soit plus bénéfique pour les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales que pour les personnes avec des habiletés élevées comme l'ont montré Kozhevnikov et Thornton (2006) et Anthony, Brown, Nias, et Tate (2013). Il est donc attendu une interaction entre la condition d'apprentissage et le niveau

d'habiletés visuo-spatiales dans la comparaison des résultats obtenus pour les participants.

5.7 Résultats

5.7.1 Évolution des scores entre pré-test et post-test

Nous avons en premier lieu recherché un gain d'apprentissage lié à l'activité sur les 10 questions liées aux mouvements de projectiles et identiques entre le pré-test et le post-test. Un test t pour groupes appariés nous a confirmé un gain de l'activité : $t(60) = -8.54, p < .001$ (cf. Figure 30).

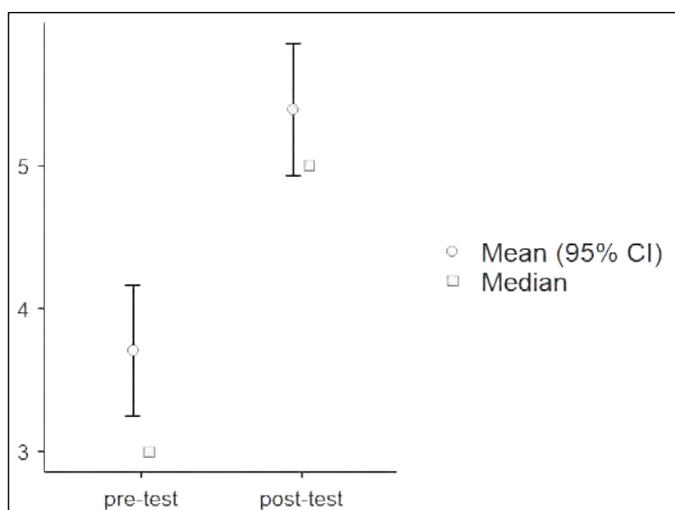


Figure 30 : Évolution de la moyenne des scores entre le pré-test et le post-test

Nous avons ensuite recherché un effet de la condition d'apprentissage, un effet des habiletés visuo-spatiales et une éventuelle interaction entre ces deux variables sur le gain lié à l'apprentissage. Le gain a été calculé en retranchant au score du post-test le score du pré-test. Une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle) a été conduite. Les résultats n'ont pas montré un effet principal de la modalité d'apprentissage, $F(1,57) = 1.95, p = .168$. Par contre un effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales a été révélé, $F(1,57) = 4.33, p = .042, \eta^2_{\text{partial}} = .071$ (cf. Figure 31). Les participants ayant de meilleures habiletés visuo-spatiales réussissent mieux au test global quelle que soit la modalité d'apprentissage mise en œuvre. Nous n'avons observé aucune interaction entre la condition d'apprentissage et les habiletés visuo-spatiales du participant, $F(1,57) = 0.001, p = .987$.

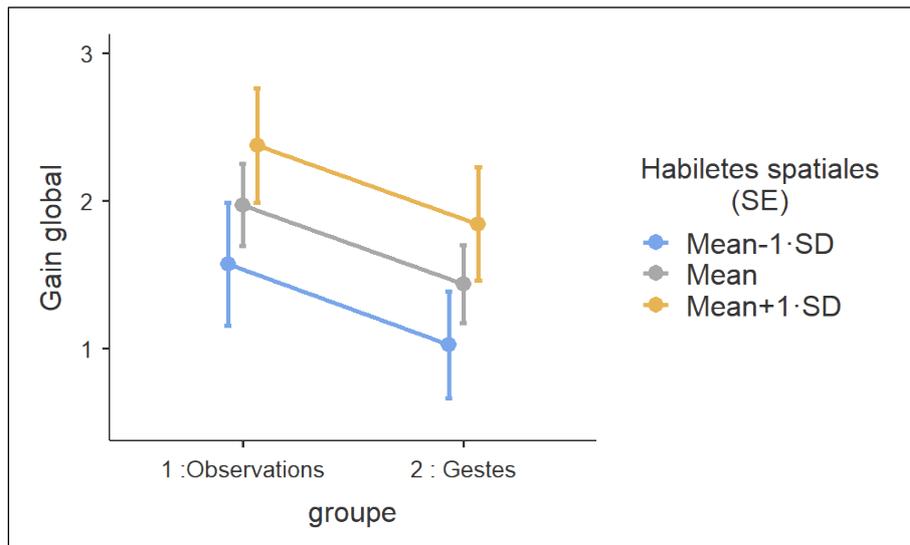


Figure 31 : Gain global obtenu selon la nature de l'activité et le niveau d'habiletés visuo-spatiales

Cette analyse concernait des scores globaux de performances mais ne permettait pas de déterminer si l'apprentissage était superficiel ou si le phénomène sous-jacent à l'allure de la trajectoire était compris. Une analyse plus fine des mesures a permis de distinguer différents niveaux de compréhension, à savoir la prédiction de l'allure des trajectoires mais également la composition des deux mouvements constitutifs de la trajectoire.

5.7.2 Prédiction qualitative des trajectoires

Nous avons donc reproduit le même type d'analyse que la précédente en ne conservant que les questions relatives à la prédiction de l'allure des trajectoires. Un test t pour groupes appariés nous a confirmé un gain de l'activité lié à ces questions : $t(60) = -8.54, p < .001$ (cf. Figure 32).

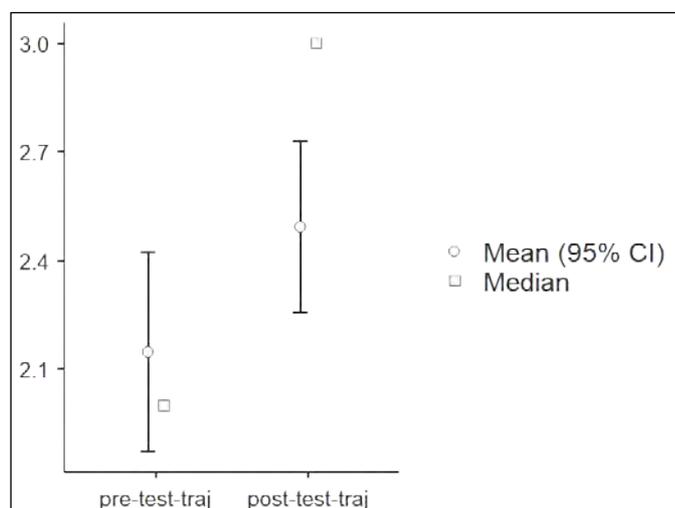


Figure 32 : Évolution des scores entre pré-test et post-test sur les prédictions qualitatives de trajectoires

Nous avons comme précédemment calculé le gain lié à ces questions et mené une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Les résultats n'ont pas montré un effet principal de la modalité d'apprentissage, $F(1,57) = 3.750, p = .058$ ni un effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(1,57) = 1.493, p = .227$ (cf. Figure 33). Nous n'avons donc obtenu aucun bénéfice du geste iconique et ce quelle que soit le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant. Nous observons même une tendance inverse avec un gain qui tend à être légèrement supérieur pour le groupe « observations ». Nous n'avons également pas observé d'effet d'interaction, $F(1,57) = .356, p = .553$.

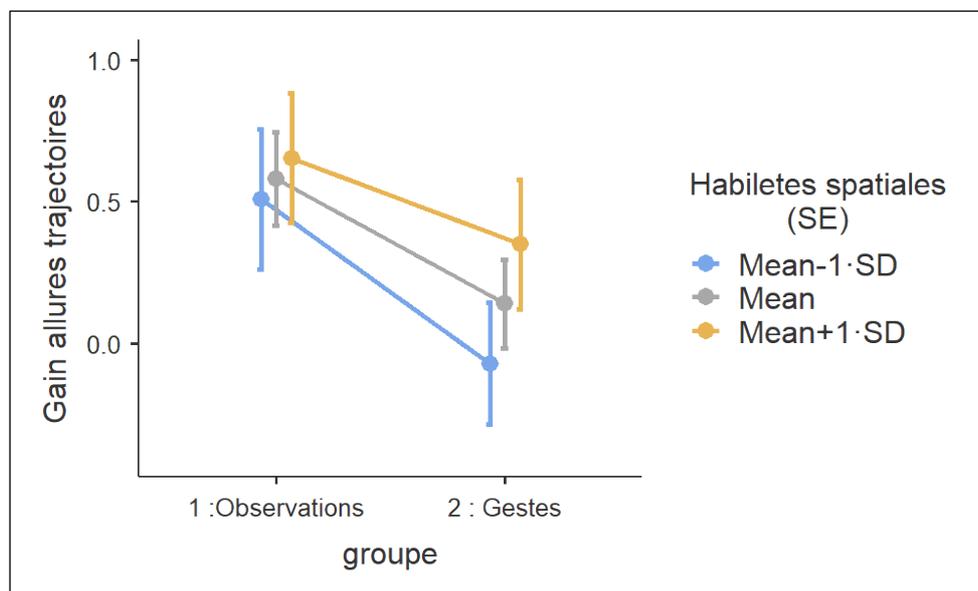


Figure 33 : Gain sur les prédictions qualitatives de trajectoires selon la nature de l'activité et le niveau d'habiletés visuo-spatiales.

5.7.3 Compréhension des phénomènes sous-jacents.

Nous avons commencé par rechercher un gain de l'apprentissage lié à ces questions. Un test t pour groupes appariés nous a confirmé un gain de l'activité lié à ces questions : $t(60) = -8.63, p < .001$ (cf. Figure 34).

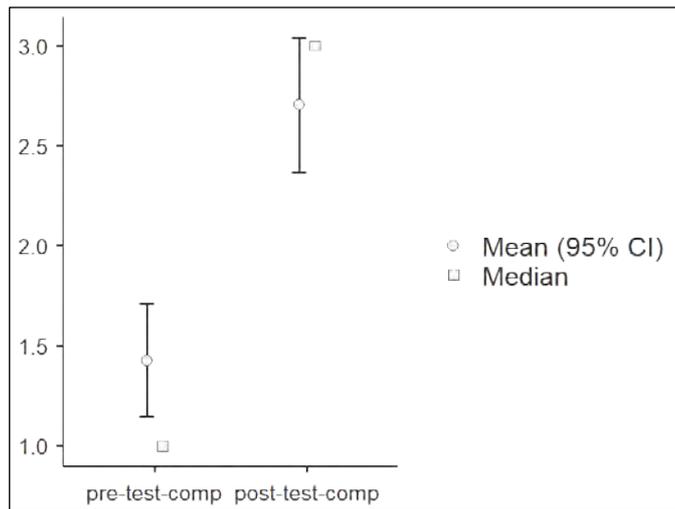


Figure 34 : Évolution des scores entre pré-test et post-test sur la compréhension des phénomènes.

Concernant les questions nécessitant d'avoir compris que la trajectoire obtenue résultait de la composition de deux trajectoires, celle d'un mouvement vertical accéléré et celle d'un mouvement horizontal uniforme, nous nous attendions à trouver un bénéfice de l'utilisation du geste. Nous avons, comme précédemment, calculé le gain lié à ces questions et mené une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Les résultats n'ont pas montré un effet principal de la modalité d'apprentissage, $F(1,57) = 0.099, p = .754$ ni un effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(1,57) = 2.965, p = .091$ (cf. Figure 35). Nous n'avons pas non plus observé d'effet d'interaction, $F(1,57) = .1838, p = .670$.

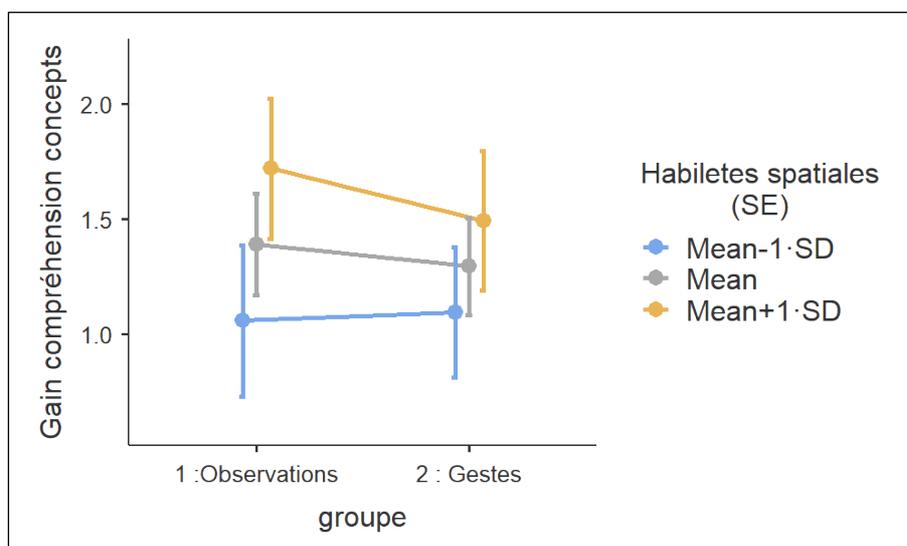


Figure 35 : Gain sur les questions de compréhension des concepts selon la nature de l'activité et le niveau d'habiletés visuo-spatiales.

A l'instar du geste iconique, le geste métaphorique produit n'a donc pas aidé les participants à mieux appréhender les concepts étudiés. Là encore, les participants avec de faibles habiletés visuo-spatiales n'ont pas tiré parti de la réalisation de ces actions motrices.

5.7.4 Stratégies auto-rapportées pour réaliser les activités pour le groupe vidéo :

Nous avons questionné les utilisateurs du groupe « observations » sur leur manière d'utiliser la vidéo dans la partie visionnage libre. Cette demande à visée exploratoire visait essentiellement à contrôler qu'un nombre non négligeable de participants ne se soient pas contentés d'un visionnage simple en une fois. Ce type de stratégie aurait pu traduire une absence d'implication dans le groupe vidéo. Nous n'avons pas observé de stratégie dominante parmi celles proposées au groupe vidéo pour décrire la manière dont ils ont utilisé la vidéo pour répondre aux activités proposées. Le tableau et l'histogramme suivant présentent la répartition des différentes stratégies mises en œuvre par le groupe vidéo.

Tableau 2 : Fréquence des stratégies utilisées après le premier visionnage de la vidéo en pourcentages.

Stratégie	Nombre	% of Total	% cumulé
Une seule fois d'un seul bloc.	5	17.2 %	17.2 %
Une seule fois en marquant des arrêts dans la vidéo (mise en pause).	5	17.2 %	34.5 %
Une première fois entièrement puis par petits bouts (mise en pause)	6	20.7 %	55.2 %
Une première fois entièrement puis par petits bouts (mise en pause et retour en arrière).	4	13.8 %	69.0 %
Plusieurs fois mais à chaque fois en regardant les vidéos entièrement (sans mise en pause).	3	10.3 %	79.3 %
Plusieurs fois en faisant des pauses et des retours en arrière réguliers.	6	20.7 %	100.0 %

Nous avons donc obtenu un panel de stratégies dans lequel la stratégie consistant à regarder la vidéo en une seule fois sans pause n'est citée qu'à 17%. Plus de 30 % des participants ont regardé la vidéo plusieurs fois.

5.7.5 Ressenti des utilisateurs sur l'utilisabilité de la tablette :

Les participants du groupe « observations » avaient au final peu d'interaction sur la tablette comparée à ceux du groupe gestes. Pour rechercher si cela avait pu induire une différence de ressenti sur l'activité d'apprentissage liée au matériel utilisé, nous avons calculé un score moyen d'utilisabilité en faisant la moyenne des scores des 5 questions posées mais en inversant le codage pour les questions 4 et 5. Nous avons procédé à une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-

spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Les analyses n'ont pas montré d'effet principal de la modalité d'apprentissage, $F(1,57) = .387$, $p = .536$, ni d'effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(1,57) = .105$, $p = .748$. Nous n'avons pas non plus observé d'effet d'interaction, $F(1,57) = .194$, $p = .662$ (cf. Figure 36).

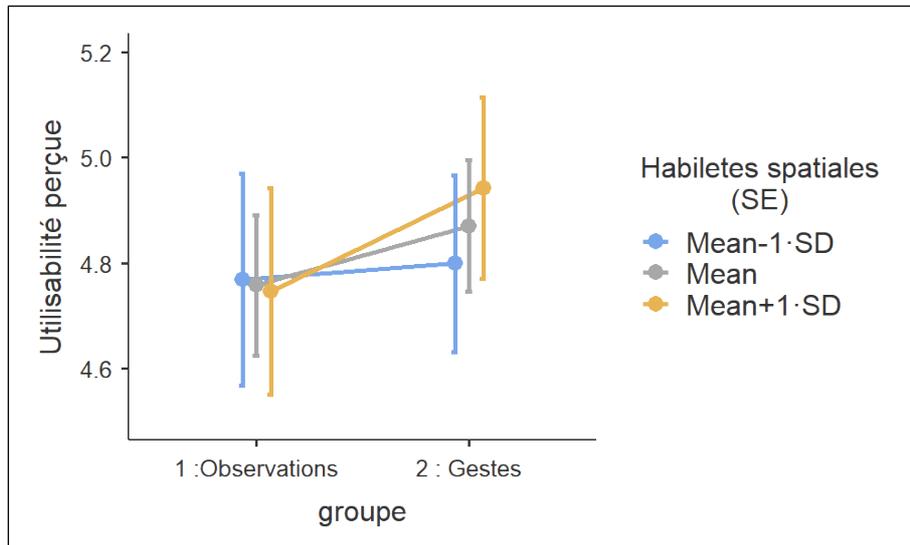


Figure 36 : utilisabilité perçue de la tablette pour réaliser les activités selon la modalité et le niveau d'habiletés visuo-spatiales.

L'utilisation active de la tablette dans la condition d'utilisation du groupe « gestes » ne semble pas avoir dérangé les participants de ce groupe et ce quel que soit leur niveau d'habiletés visuo-spatiales.

5.7.6 Ressenti sur l'efficacité de l'activité d'apprentissage.

Concernant le ressenti sur l'activité d'apprentissage a été posée la question : « Suite aux activités proposées vous pensez être plus à même de comprendre le mouvement d'un objet dans le champ de pesanteur et selon les cas d'en déduire sa trajectoire ? »

Le ressenti des participants est encore positif, la moyenne est voisine de 4,5 sur 6 : $M = 4,46$, $ET = .765$.

Nous avons également recherché une différence de ressenti entre les groupes et l'influence des habiletés visuo-spatiales dans ce ressenti. Une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle) ne nous a pas donné d'effet principal de la modalité d'apprentissage, $F(1,57) = .021$, $p = .884$, ni d'effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(1,57) = .410$, $p = .524$ (cf. Figure 37). Nous n'avons pas non plus observé d'effet d'interaction, $F(1,57) = .059$, $p = .809$.

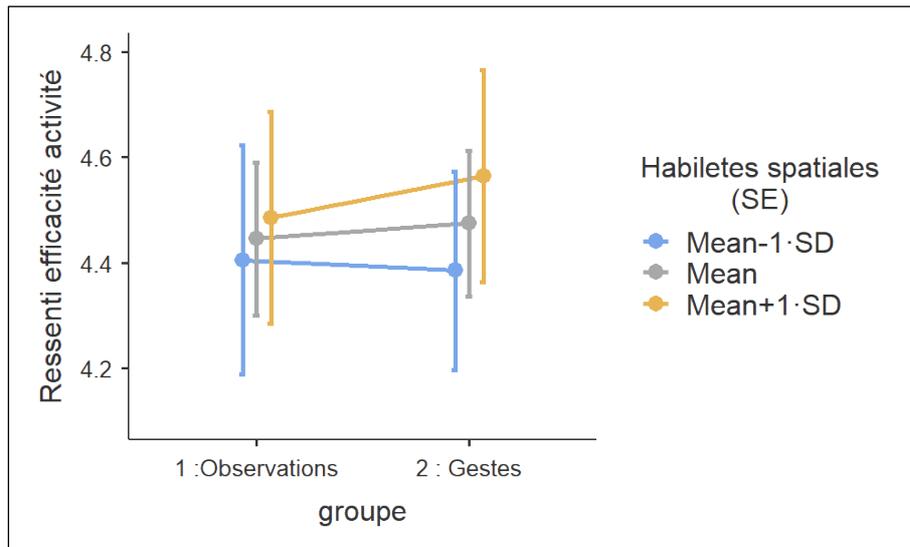


Figure 37 : Ressenti sur l'efficacité de l'activité d'apprentissage selon la modalité d'apprentissage et les habiletés visuo-spatiales.

5.8 Discussion

Notre première hypothèse était que l'utilisation d'un geste iconique de tracé apporte une amélioration notable des prédictions qualitatives des trajectoires des objets en mouvement dans le champ de pesanteur lors du test post-activité comparativement à la simple observation de ces trajectoires observées sur le simulateur. Cette hypothèse n'est pas vérifiée. Nous obtenons même une amélioration légèrement plus importante chez les personnes ayant observé les trajectoires sur le simulateur même si cette évolution n'est qu'une tendance proche du seuil de signification. Ce résultat semble en contradiction avec les résultats de de Koning et Tabbers (2013). Ces auteurs avaient montré une supériorité de l'observation de gestes et de la production de gestes sur la compréhension de mouvements non humains par rapport à l'absence de gestes.

Dans notre seconde hypothèse nous attendions que l'utilisation du geste Multitouch métaphorique pour reconstruire la trajectoire amène à une compréhension accrue des phénomènes sous-jacents, à savoir que l'allure de la trajectoire correspond à la composition de deux mouvements. Là encore, cette hypothèse est infirmée par les résultats obtenus. Une progression de la compréhension de ce phénomène est bien présente entre le pré et le post test mais elle est identique que l'apprenant réalise les gestes ou ne les réalise pas.

Enfin, dans notre troisième hypothèse, nous nous attendions à ce que les bénéfices des gestes produits sur la tablette soient supérieurs pour les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales. Là encore, il n'en a rien été. Les apprenants ayant de fortes habiletés visuo-

spatiales ont bien obtenu un gain supérieur lié à l'activité d'apprentissage mais ce gain est obtenu quelle que soit la modalité d'apprentissage utilisée. La sous analyse des questions a montré que ce bénéfice se retrouvait seulement sur la prédiction de l'allure des trajectoires et non sur la compréhension des concepts sous-jacents. Il est donc probable que les habiletés visuo-spatiales élevées aident mieux à se représenter l'allure de la trajectoire de projectiles dans l'espace.

Pourquoi est-ce que les gestes réalisés dans cette activité, que ce soit le geste métaphorique ou le geste iconique n'améliorent-ils pas l'apprentissage ? Pourquoi ces deux gestes représentatifs du mouvement étudié ne permettent-ils pas un meilleur encodage des informations en mémoire de travail ? Les gestes réalisés sont pourtant bien significatifs par rapport au contenu étudié mais pour autant ils ne permettent pas une meilleure compréhension des phénomènes étudiés. Nous allons donc évoquer trois pistes pour tenter d'expliquer ces résultats.

La première piste est un mauvais calibrage de la difficulté de la tâche ayant induit une charge cognitive intrinsèque trop importante. En effet, les gestes à produire par l'apprenant n'étaient pas comme dans l'étude de de Koenig et Tabbers (2013) un simple suivi de mouvement à l'écran. Le geste métaphorique vertical nécessitait un calcul préalable d'échelle pour dessiner une ligne verticale de longueur correcte correspondant à la perte d'altitude réelle de l'objet. En plus de l'effort cognitif qu'elle demande, cette activité peut amener à des erreurs de calculs conduisant à des tracés de segments de droite erronés. L'allure de la trajectoire résultante tracée pouvait donc être très approximative. De plus, les apprenants n'avaient pas de retour de la part du dispositif d'apprentissage concernant ce geste produit. Ce risque n'était pas présent dans le groupe d'observations des trajectoires.

Une deuxième piste pour expliquer l'inefficacité de la production de gestes dans cette expérience peut être la faible quantité de gestes produits et la faible amplitude de ces derniers. Dans notre hypothèse qui était que le geste apporte un surplus d'informations, lors de l'encodage de stimuli externes, nous n'avons pas tenu compte de la quantité d'informations potentiellement apportée par cette action motrice. Il est possible que la quantité d'activation du système moteur soit liée à l'amplitude du geste réalisé. Or, les gestes réalisés sur une interface Multitouch sont d'amplitude modérée. Dès lors pour qu'une information pertinente soit apportée, il aurait probablement fallu multiplier les gestes produits, ce que la durée limitée de l'activité n'a pas permis. Demander aux participants de systématiquement repasser

au doigt les trajectoires jouées lors des simulations effectuées aurait peut-être été profitable à l'apprentissage des trajectoires.

Une dernière piste à envisager pour expliquer nos résultats se trouve peut-être dans les écrits de De Koning et Tabbers (2013). Ces auteurs ont noté que, bien que produire des gestes conduit évidemment à l'activation la plus forte du système moteur de l'apprenant, elle exige un effort et une attention de la part de l'apprenant qui pourraient détourner l'attention de celui de la tâche d'apprentissage primaire. On peut dès lors évoquer un effort extrinsèque à l'activité d'apprentissage trop important pour manipuler le simulateur et le logiciel de dessin. En effet, ces deux logiciels disposaient de multiples paramétrages et, dans le groupe gestes, leur gestion était à la charge des apprenants. Il est possible que la production de gestes dans ces environnements ait été plus coûteuse que la simple observation d'un simulateur.

Il nous reste donc, dans une troisième et dernière étude à tester l'effet de la réalisation d'un geste sur l'attention dans une tâche d'apprentissage réalisée avec une tablette tactile. C'est ce que nous avons fait dans notre troisième expérience en choisissant cette fois un geste de suivi de mouvement qui ne nécessite pas la mise en œuvre des concepts étudiés, pour être réalisé correctement. Cette dernière étude visait à étudier les conversions d'énergie entre énergie cinétique et potentielle lors de l'évolution d'un skateur sur une rampe. Nous allons développer cette expérience dans le prochain chapitre.

Chapitre 6 : Effet du geste sur l'attention lors de l'utilisation d'un simulateur en mécanique.

6.1 Introduction

Nous avons dans les deux études précédentes testé les effets du geste sur la facilitation d'une tâche de rotation mentale et sur l'encodage des informations en mémoire et la compréhension, dans le cadre d'une interaction Multitouch sur tablettes tactiles. Ces études ont porté sur :

- La réalisation d'une tâche purement spatiale d'une part : rotation d'un objet 3D à des fins de comparaison de deux figures dans l'espace. Un geste iconique était utilisé ici.
- La réalisation d'une tâche cognitive de plus haut niveau d'autre part, à savoir l'étude du mouvement d'un objet dans le champ de pesanteur à partir de l'analyse de trajectoires obtenues afin de prédire des trajectoires. La combinaison d'un geste iconique et d'un geste métaphorique a été utilisé.

Dans ces deux expériences, le niveau d'habiletés visuo-spatiales des participants était un facteur prédictif de la réussite de la tâche. Cependant, dans un cas, comme dans l'autre, nous n'avons pas réussi à mettre en évidence un réel bénéfice du geste même pour les personnes d'habiletés visuo-spatiales faibles. Contrairement à certains résultats en lien avec la cognition incarnée, les résultats précédents ne nous permettent donc pas, à ce stade, d'envisager l'interaction Multitouch comme une nouvelle modalité d'encodage d'informations venant enrichir les modalités visuelles et auditives.

Pour autant, afin d'optimiser les interfaces Multitouch proposées, notamment dans les nombreuses simulations en sciences, il nous semble intéressant dans une dernière étude d'essayer de mieux comprendre quel peut être le rôle du geste dans les différents processus cognitifs mis en jeu lors d'une tâche d'apprentissage sur interface informatisée. Pour cela, dans ce chapitre nous détaillons la notion d'orientation de l'attention en essayant de voir si nous pouvons envisager le geste comme une forme de guidage attentionnel permettant de faciliter la tâche d'apprentissage en plus d'une fonction d'encodage.

Nous proposons une expérience mettant en jeu une simulation de mouvement en introduisant un geste de suivi pour ce dernier. Cette expérience a été construite en s'appuyant sur le modèle APM de Lowe et Boucheix (2008), seul modèle, à notre connaissance, spécifique aux traitements cognitifs mis en jeu dans les animations. Nous essayons dans cette étude de déterminer si ce geste de suivi, non implémenté dans l'IHM de départ, peut faciliter

la compréhension des phénomènes étudiés en focalisant l'attention de l'apprenant sur des points importants ou au contraire être un distracteur attentionnel néfaste à l'objectif de départ.

6.2 Orientation de l'attention : la notion de guidage attentionnel

Basculer son attention d'un stimuli à un autre est en fait le fonctionnement naturel de notre cerveau. Dans son ouvrage « Le cerveau funambule », pour expliquer le fonctionnement naturel du cerveau, Jean-Philippe Lachaux (2015) utilise la métaphore du chercheur d'or qui à chaque fois qu'il cherche en un endroit se demande s'il ne devrait pas trouver un meilleur endroit. Il en sera de même pour notre cerveau soumis en permanence à des stimuli de toutes sortes. Cela sera particulièrement vrai dans le cas d'animations multimédias dans lesquelles une multitude d'informations apparaissent de manière transitoire dans différentes zones de l'écran. Cela est très bien résumé par Koning, Tabbers, Rikers et Paas (2009, p.114 notre traduction) : « Lors de la visualisation d'une animation, les apprenants doivent non seulement intégrer de nouvelles informations avec les connaissances existantes qui sont stockées dans la mémoire à long terme (LTM), mais aussi avec des informations déjà présentées qui doivent être maintenues actives dans la mémoire de travail (WM). Par conséquent, la nature transitoire des animations peut amener les apprenants à répartir leur attention visuelle sur différents éléments dispersés dans le temps. »

Du fait donc de la nature des animations, l'attention de l'apprenant sera en permanence captée par ces phénomènes transitoires : il est par conséquent important de mettre en place des actions de guidage attentionnel pour l'apprenant. Mais quels types de guidage mettre en œuvre ? Et pour quels bénéfices ?

Le guidage attentionnel peut être bénéfique pour focaliser l'attention sur les points importants à relever mais également pour faire le lien spatio-temporel entre ces points (Koning & Jarodzka, 2017). Dans leur cadre conceptuel dédié au guidage attentionnel dans les animations, Koning, Tabbers, Rikers et Paas (2009) classent ces guidages selon trois fonctions :

1. Attirer l'attention de l'utilisateur sur les points saillants de l'animation pour faciliter la sélection et l'extraction de ces derniers.
2. Mettre en relief les thèmes traités et l'organisation entre ces thèmes.
3. Rendre les relations entre les éléments plus saillantes pour favoriser leur intégration.

Les repères visuels guident bien l'attention mais sont souvent insuffisants pour favoriser la compréhension d'un phénomène dynamique, selon les retours de ces auteurs.

Notamment les indices qui ont pour but de faire le lien entre les différents éléments de l'animation pour favoriser leur intégration, n'ont pas fait leur preuve en matière de compréhension du phénomène dynamique étudié. De plus, dans leur analyse récente sur l'efficacité des animations dans l'apprentissage comparativement à des informations statiques, Berney et Bétrancourt (2016) n'ont pas réussi à mettre en évidence un effet positif des guides attentionnels sur la compréhension des phénomènes mis en jeu dans les animations. La majorité des guidages attentionnels utilisés est issue des techniques de guidage utilisées dans les textes ou les images statiques (mise en surbrillance, couleur...). Cela explique peut-être leur inefficacité dans l'apprentissage avec des animations.

Nous allons donc considérer le geste ici comme une forme nouvelle de guidage et nous essaierons de voir quels processus en mémoire de travail peuvent être soutenus par ces gestes (mémorisation et/ou traitement des informations). Nous allons essayer de déterminer si le geste peut, en focalisant l'attention sur un point de traitement, limiter la durée de ce dernier et donc in-fine la charge cognitive d'une tâche ?

Afin de déterminer le meilleur geste à utiliser pour répondre à cette question, nous allons dans un premier temps essayer de comprendre quels sont les processus mis en œuvre par les apprenants utilisant des animations. Lowe et Boucheix (2008) ont décrit ces processus dans les cinq phases de leur modèle APM (*Animation Processing Model*), modèle que nous décrirons dans la partie suivante. Dans une autre partie, nous procéderons enfin à une analyse cognitive de la tâche demandée, afin de repérer les opérations à réaliser en mémoire de travail (opération de rétention d'informations ou opération de traitement) en les mettant en relation avec le modèle APM.

6.3 Le modèle APM : *Animation Processing Model*

Lowe et Boucheix (2008) proposent un modèle de construction mentale des représentations d'un apprenant à partir d'une animation. Ce modèle a été élaboré à partir de l'étude d'animations mettant en œuvre des dispositifs techniques en mouvement et donc nécessitant la mise en relation de liens spatio-temporels entre différentes pièces en mouvement (typiquement le mécanisme d'un piano ici).

Nous allons tester sa transposition dans une situation plus conceptuelle, à savoir l'étude d'animations mettant en œuvre des relations spatio-temporelles entre des grandeurs physiques. Dans cette étude, l'apprenant devra extrapoler des relations entre les grandeurs positions et vitesse d'une part, et énergie cinétique et énergie potentielle d'autre part, et en

déduire les transferts entre les différentes grandeurs au cours du mouvement d'un objet. Ce sont donc bien ici des liens spatio-temporels entre des concepts et non entre des objets comme dans les études de Lowe et Boucheix (2008) que nous allons étudier.

Lowe et Boucheix (2008) envisagent 5 phases dans l'élaboration mentale d'un modèle par un apprenant à partir d'une animation (cf. Figure 38). Les deux premières phases sont essentiellement perceptuelles (exclusivement pour la première) et donc sous l'influence de processus ascendants (*bottom-up*). Cela reste à confirmer mais il est probable que les auteurs ont envisagé essentiellement des stimuli visuels comme source initiale d'informations. Dans la première phase du modèle, l'apprenant décompose l'animation en entités discrètes possédant un comportement dynamique. Cette phase initiale se produit lors d'une exploration très localisée dans l'animation. S'en suit une phase d'association de ces entités discrètes en petites entités plus vastes « micro-chunks » possédant une relation dynamique entre elles mais sans élaboration encore d'un « modèle du fonctionnement de l'animation ». Ces phases sont essentielles pour la construction ultérieure d'un modèle cohérent du phénomène dynamique étudié.

Les phases trois à cinq vont être de plus en plus sous l'influence de processus de type descendants (*top-down*). L'expérience de l'apprenant et son niveau de connaissances antérieures sur le sujet vont donc être importants dans ces phases. Dans la phase trois, l'apprenant développe une vision complète de l'animation en termes de liens entre les divers micro-chunks à travers l'espace et le temps mais sans forcément établir de relations fonctionnelles entre ces micro-chunks en termes de compréhension du phénomène dynamique étudié. Cette causalité en termes d'apport fonctionnel au phénomène étudié fait l'objet de la phase 4. Cette dernière étape est la dernière avant l'élaboration d'un modèle mental cohérent et robuste du phénomène étudié, permettant son réinvestissement dans des situations variées et différentes de celle de l'animation présentée (phase 5 du modèle APM).

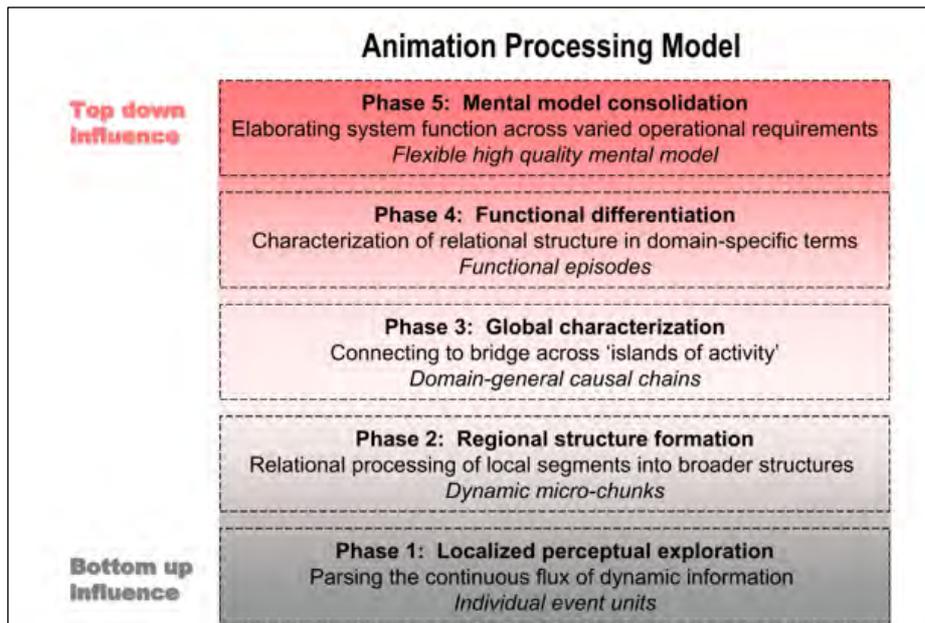


Figure 38 : Animation Processing Model (tiré de Lowe et Boucheix, 2011)

Ce modèle présente bien le rôle crucial des informations initiales extraites dans l'animation en vue de la construction ultérieure d'un modèle mental cohérent. Or, comme l'a montré Lowe (1999), les apprenants sont spontanément attirés par les informations les plus saillantes et pas forcément les plus pertinentes pour la compréhension du phénomène. Bien que le domaine d'expertise sur le sujet puisse moduler ce phénomène, nous pouvons penser que des indices attentionnels, dirigeant l'attention vers les points clés de l'animation, pourront donc être bénéfiques pour favoriser le point évoqué précédemment, à savoir focaliser l'attention sur un point pertinent nécessitant un traitement cognitif.

6.4 Les différentes formes d'énergie en mécanique et leurs conversions

6.4.1 Description et analyse cognitive de la tâche

Dans un premier temps nous allons décrire les objectifs d'apprentissage de cette étude, puis nous verrons les modalités pédagogiques retenues avant d'analyser en termes de processus cognitifs les actions mises en jeu.

L'objectif d'apprentissage est dans une première partie, que les élèves comprennent qu'en l'absence de frottements, l'énergie mécanique globale d'un système, à savoir ici un skateur sur une rampe, se conserve au cours du mouvement. Cette énergie mécanique peut prendre la forme de deux types d'énergie :

- L'une liée à la position du skateur (énergie potentielle de pesanteur).
- L'autre liée à sa vitesse (énergie cinétique du skateur).

La notion d'énergie cinétique faisant partie du programme du collège, les élèves doivent avoir certaines connaissances antérieures sur cette notion, notamment la relation liant l'énergie cinétique et la vitesse : $E_c(J) = \frac{1}{2}.m.v^2$ avec la masse en kg et la vitesse en $m.s^{-1}$. La notion d'énergie potentielle de pesanteur n'aura pas été introduite en classe et il est probable que la majorité des élèves découvriront cette notion.

En observant l'évolution du skateur (altitude et vitesse), ainsi que les graphes des différentes énergies, ils devront donc appréhender que :

- Plus le skateur est haut, plus son énergie potentielle est grande et son énergie cinétique basse.
- Plus le skateur est bas, plus son énergie potentielle est basse et son énergie cinétique élevée.
- Il y a au cours du mouvement, transfert d'un type d'énergie à l'autre donc l'énergie totale se conserve. Cela implique que le skateur lancé d'un point d'altitude z_A ne pourra jamais remonter quel que soit la forme du circuit plus haut que l'altitude de ce point.

Dans une deuxième partie les frottements seront introduits et l'objectif sera de comprendre que l'énergie mécanique totale diminue continûment au cours du mouvement à cause des dissipations d'énergies liées aux frottements. Un skateur qui part donc d'un point d'altitude z_A ne pourra donc jamais remonter à cette altitude quel que soit la forme ultérieure du circuit.

Les participants devront donc mettre en relation les positions du skateur au cours du mouvement avec les positions des différentes jauges. Dans cette expérience, comme dans la précédente, les habiletés visuo-spatiales mises en jeu seront de type extrinsèque dynamique.

Nous allons maintenant détailler les modalités pédagogiques retenues pour cette étude :

- Dans un premier temps un apport des connaissances nécessaires, à savoir la définition des notions d'énergie cinétique, d'énergie potentielle et d'énergie mécanique sera proposée sous la forme d'une capsule vidéo. Les différents concepts seront explicités et les relations liant les grandeurs du système seront posées. Comme nous l'avons dit, il est probable que les élèves possèdent quelques notions liées à l'énergie cinétique. Il est cependant peu probable que le concept soit pleinement maîtrisé par une grosse majorité

d'élèves donc le concept sera introduit comme s'il était nouveau. Il sera demandé aux élèves de bien retenir les relations proposées.

- Une deuxième partie proposera aux élèves de manière exploratoire, d'observer, à partir de différentes positions de départ du skateur et pour différents circuits, l'évolution de ce dernier et les conséquences sur les différentes formes d'énergie.
- Une troisième partie sera réalisée de manière identique en introduisant les frottements.
- Enfin, une tâche d'évaluation sous forme de restitution littérale des connaissances acquises au cours de l'expérience et de réinvestissement sous la forme d'exercices permettra d'analyser la profondeur de l'encodage des connaissances réalisées.

Le tableau suivant récapitule ce protocole, en précisant le type d'action à réaliser en mémoire de travail (mémorisation ou traitement) en fonction de l'activité réalisée ainsi que la phase du modèle APM concernée :

- La première tâche concerne le visionnage de la vidéo et nous aurons essentiellement une action de mémorisation des définitions et des relations.
- Les tâches suivantes sur le simulateur nécessiteront un traitement en mémoire de travail pour établir des liens entre les observations ou gestes réalisés et leurs conséquences sur les grandeurs physiques. Ces liens devront ensuite être mémorisés en mémoire de travail et rappelés pour les actions suivantes. Comme indiqué sur le tableau ci-dessous, les actions correspondent à différentes phases du modèle APM, et pour passer d'une phase à l'autre il sera nécessaire de réactiver en mémoire de travail les informations des précédents stades.

En nous appuyant sur le modèle de Barrouillet et al. (2004) concernant le fonctionnement de la mémoire de travail il nous faudra donc essayer de limiter la durée de traitement de chaque action pour empêcher la dégradation des informations mémorisées et permettre leur réactivation au plus tôt lors de la phase suivante du modèle APM.

Tableau 3 : Analyse de la tâche d'apprentissage

Activité	Objectif d'apprentissage	Action de l'apprenant	Traitement en mémoire de travail
Partie I : Visionnage d'une vidéo	Introduire les concepts d'énergie et les définitions associées.	Observer et écouter la vidéo	Mémorisation des définitions
Partie II : Exploration avec simulateur sans frottements	Évolution des différentes énergies	Observer les histogrammes d'énergie, jauge de vitesse et suivre les évolutions du skateur	APM (étape 1)
	Évolution du skateur (position et vitesse).		APM (étape 2)
	Lien entre type d'énergie et grandeur associée sur le skateur.		APM (étape 3)
	Variations inverses de l'énergie cinétique et potentielle de pesanteur.		APM (étapes 4 et 5)
	Transfert d'énergie cinétique E_c en énergie potentielle de pesanteur E_p (montée) et inversement (descente).		APM (étapes 4 et 5)
	Conservation de l'énergie mécanique totale.		APM (étapes 4 et 5)
Partie II : Simulateur avec frottements	Hauteur initiale (donc énergie initiale) qui sous-tend le mouvement dans les collines.	APM (étapes 4 et 5)	APM (étapes 4 et 5)
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Les maximums d'énergie cinétique et potentielle de pesanteur diminuent à causes des frottements. 2. L'énergie totale diminue au cours du mouvement. 		APM (étapes 4 et 5)

6.4.2 Introduction du geste dans la réalisation de la tâche

Dans cette expérience, nous allons utiliser le geste comme modulateur de l'attention. Pour l'un des groupes, nous allons demander aux participants de suivre avec le doigt, en temps réel, le mouvement du skateur. Pour un autre groupe, ils devront suivre à l'aide du doigt la variation de la jauge d'énergie cinétique.

Quelles peuvent être les conséquences de cette consigne sur la compréhension du phénomène étudié pour les utilisateurs ? A ce stade plusieurs pistes peuvent être considérées :

1. Cette action pourrait permettre aux participants de mieux ressentir que la vitesse (et donc l'énergie cinétique) n'est pas constante au cours du mouvement, qu'elle augmente lorsque le skateur descend et qu'elle diminue lorsque le skateur monte pour devenir nulle lors d'un changement sens du mouvement. Ce type de guidage correspondrait au point 1 du cadre conceptuel de Koning et al. (2009) à savoir : attirer l'attention de l'utilisateur sur les points pertinents de l'animation pour faciliter la sélection et l'extraction de ces derniers. Ce faisant l'étape 1 du tableau précédent (APM niveau 1) pourrait être facilitée, à la condition, que cette action de guidage de l'attention ne focalise pas l'attention uniquement sur le skateur au détriment des jauges d'énergie dans cette phase d'exploration des éléments dynamiques de l'animation et vice-versa. Pour éviter cela, nous demanderons aux participants d'observer l'évolution de l'animation sur plusieurs allers-retours avant d'introduire le geste.
2. Dans l'étape 2 du tableau, correspondant au niveau 2 du modèle APM, les apprenants devront faire le lien entre les évolutions des grandeurs cinétiques et potentielles, et l'évolution du skateur et en déduire dans l'étape 3 qu'elles varient en sens inverses (APM niveau 3). Pour ce faire, leur attention devra en permanence être partagée entre les évolutions du skateur et l'évolution des histogrammes. Dans cette étape, le geste pourra donc être bénéfique ou contre-productif selon le rôle qu'on lui attribue :
 - a. Bénéfique dans une perspective de cognition incarnée où il libérerait des ressources en mémoire de travail en utilisant l'action motrice comme une source d'encodage d'informations. Cette hypothèse de l'augmentation des capacités en mémoire de travail du fait de l'existence d'un canal spécifique de traitement des informations motrices par le système psychomoteur a été faite par Van Gog et al. (2009). Dans cette perspective, le geste serait vu comme un guidage permettant de rendre les relations entre les éléments plus saillantes pour favoriser leur intégration, soit le point 3 du cadre de (Koning et al., 2009).

- b. Contre-productif si le geste focalise trop l'attention sur le skateur au détriment des jauges d'énergie et de leurs évolutions respectives et inversement pour le dernier groupe.

Nous allons considérer ici, que le fait de faire visionner au départ quelques moments l'animation sans geste de suivi évitera le côté contre-productif du point b et ne garderons donc que l'aspect correspondant au point a : un geste bénéfique car permettant un apport supplémentaire d'informations.

Les effets du geste étudiés, ici, n'auront probablement une influence directe que sur les phases 1, 2 et 3 du modèle PAM, phases mettant en jeu des processus sous forte influence *Bottom-Up*. Ceci étant, ces phases sont indispensables pour une compréhension ultérieure des phénomènes dans les étapes suivantes de notre tableau. Il nous faudra donc lors des tests post-manipulations prévoir des tests spécifiques de ces processus ainsi que des tests de compréhension globale des notions étudiées. Cela nous permettra de plus de tester la validité de notre transposition du modèle APM à l'étude à partir d'une animation de nature différente de celle ayant servi à l'élaboration du modèle. Il nous faut également envisager un dispositif permettant de vérifier si le geste a un effet sur la durée de traitement des informations en mémoire de travail et quelle peut être la conséquence de l'augmentation de cette durée sur les phénomènes de compréhension du concept mais également de rétention des informations.

6.5 Hypothèses

Les points précédents nous amènent à formuler les hypothèses suivantes :

Hypothèse 1 : L'utilisation d'un geste de suivi au doigt d'un mouvement pertinent dans l'animation focalisera l'attention de l'apprenant sur ce point. Cela conduira à une meilleure prise en compte des points pertinents de la simulation et à leur mise en relation (phase 1 et 2 du modèle APM). Il s'en suivra une meilleure compréhension du phénomène par élaboration d'un modèle mental plus pertinent (phase 3 à 5 du modèle APM). Ce phénomène sera plus efficace sur le suivi du skateur car le mouvement d'un individu en mouvement devrait mener à une stimulation plus importante du système moteur en accord avec la théorie incarnée de la cognition.

Hypothèse 2 : La facilitation de la mise en relation de points dynamiques distants sur l'écran devrait réduire les effets bénéfiques du niveau d'habiletés spatiale des apprenants. En l'absence de gestes, les habiletés visuo-spatiales devraient avoir un effet positif sur l'apprentissage.

Hypothèse 3 : Cette focalisation de l'attention sur un point saillant de l'animation devrait augmenter la durée de traitement des informations en mémoire de travail. Cette hausse devrait être néfaste à la mémorisation des relations en accord avec le modèle TBRS de la mémoire de travail.

6.6 Méthodologie

6.6.1 Participants

Soixante-dix-neuf élèves de seconde d'environ 16 ans ($M = 16.09$, $ET = .286$), ont participé à cette étude. Ils étaient répartis en trois groupes équivalents en termes d'habiletés de raisonnement mécanique et d'habiletés visuo-spatiales. Une évaluation en ligne mesurant ces grandeurs et réalisée la semaine avant l'expérience a permis la constitution des groupes.

6.6.2 Matériel

6.6.2.1 Test de raisonnement mécanique

Les capacités de raisonnement Mécanique ont été mesurées à l'aide d'une adaptation en ligne du test de raisonnement mécanique de la batterie de tests DAT5. Ce test comportait 30 questions. Le temps de réponse était limité à 15 min. Un exemple d'item de ce test est présenté ci-dessous (cf. Figure 39) :

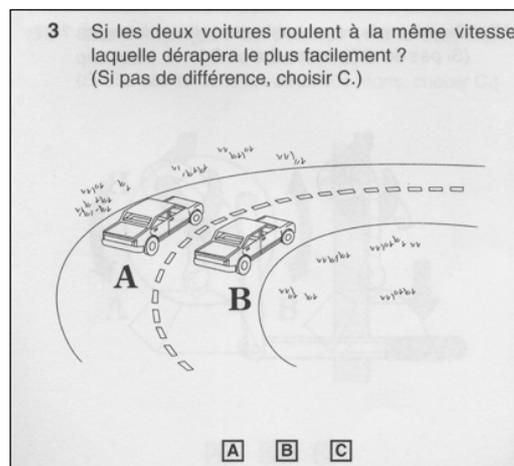


Figure 39 Un exemple d'item du test de raisonnement mécanique du DAT5.

Avant le départ du test deux exemples étaient proposés aux participants avec explications sur les réponses pour que ces derniers cernent bien l'objectif testé dans les questions. Il leur était demandé de donner une seule réponse par problème et de répondre le plus rapidement possible et le plus correctement possible, le temps étant limité.

6.6.2.2 Test d'habiletés visuo-spatiales

Les habiletés visuo-spatiales ont été mesurées à l'aide d'une version informatisée du *card rotation test* élaboré par Ekstrom, Dermen, et Harman (1976). Cet test a également été utilisé pour évaluer le rôle des habiletés visuo-spatiales dans l'apprentissage à partir d'animations pédagogiques par Höffler et Leutner (2011). Il est intéressant de noter que dans leur étude, de bonnes habiletés visuo-spatiales garantissaient un meilleur apprentissage mais sur des images statiques seulement : l'animation palliait donc au besoin de construction d'images mentales. Il s'agit d'un test simple de rotation mentale en une étape d'un objet bidimensionnel : ce type de test (mesure de relations spatiales) met l'accent sur la vitesse de traitement. (Kozhevnikov & Hegarty, 2001). Ce test en temps limité (2x3min) présente deux séries de 10 cas dans lesquels les participants doivent dire si différentes vues d'un objet représentent des objets identiques ou différents comme dans l'exemple ci-dessous (cf. Figure 40)



Figure 40 : un item du card rotation test (Höffler & Leutner, 2011).

6.6.2.3 Activité 1 : apport de notions à partir d'une vidéo

La première activité de l'expérience consistait à visionner une vidéo donnant les définitions et les relations de l'énergie mécanique totale d'un système, de son énergie cinétique et de son énergie potentielle de pesanteur. L'image ci-dessous (cf. Figure 41) représente une capture d'écran de la partie expliquant la notion d'énergie potentielle de pesanteur d'un système. Cette énergie étant liée à l'altitude z_1 du plongeur, la relation permettant de calculer son énergie potentielle de pesanteur, à partir de la relation générale, était détaillée à l'écran.

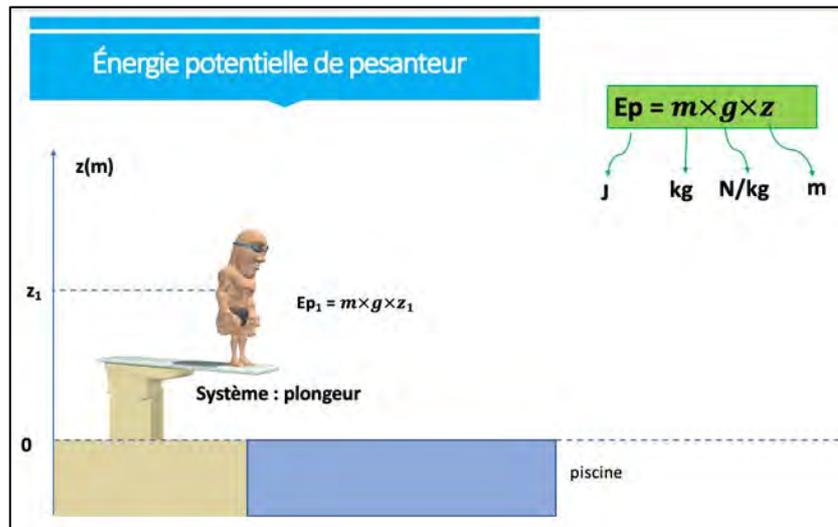


Figure 41 : capture d'écran de la vidéo d'apport de notions.

6.6.2.4 Simulateur

Le simulateur, accessible librement en ligne sur le site de l'université du Colorado, permet de suivre l'évolution de la vitesse et de la position d'un skateur sur une rampe. Il est disponible en français et au format HTML5, ce qui le rend lisible sur toutes les tablettes du marché sans installation supplémentaire. L'évolution des grandeurs énergie cinétique et potentielle de pesanteur du skateur sont accessibles sous forme de jauges d'énergie sur la partie gauche de l'écran. Enfin, il est possible de faire varier la forme du circuit et d'introduire des forces de frottements. La figure ci-dessous (cf. Figure 42) présente l'interface de ce simulateur.

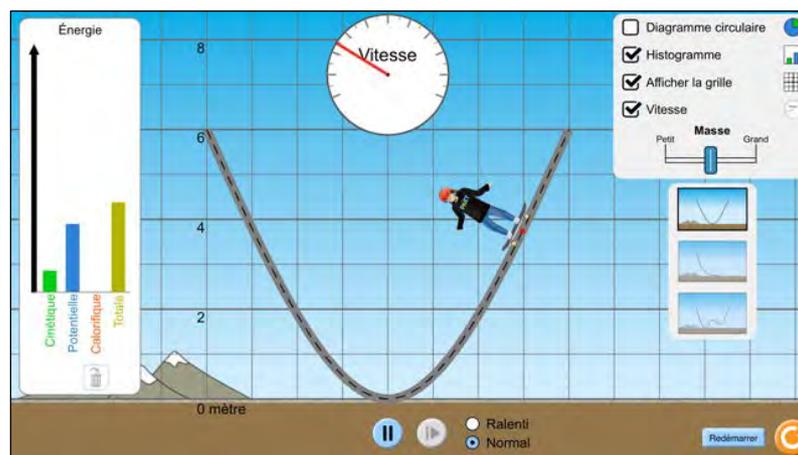


Figure 42 : Aperçu du simulateur en fonctionnement.

Pour utiliser le simulateur, il suffit de lâcher le skateur d'une position initiale sur la rampe et d'observer le mouvement et l'évolution des jauges d'énergie ou de vitesse. Un

mode ralenti permet de ralentir le mouvement du skateur et donc le déroulement de la simulation.

6.6.2.5 Activité d'apprentissage sur le simulateur

Dans cette phase, les objectifs et consignes suivantes ont été donnés aux élèves.

Objectifs : Utiliser le simulateur dans les différents cas ci-après pour comprendre les évolutions des énergies cinétiques et potentielles au cours du mouvement.

Pour chacun des groupes la consigne différait sur l'utilisation du simulateur. Pour le groupe contrôle, aucun geste de suivi n'était demandé. Pour les groupes « skateur » et « jauge » un mouvement de suivi au doigt était imposé. Les différentes consignes sont rapportées ci-dessous :

Conditions d'apprentissage :

a : groupe « contrôle » : pour chacun des cas suivants, observer l'animation pendant environ une minute pour répondre à l'objectif précédent.

b : « groupe skateur » : pour chacun des cas suivants, observer l'animation pendant environ une minute pour répondre à l'objectif précédent. Au bout de quelques aller-retours du skateur suivre son mouvement au doigt (point rouge sous le skateur) en continuant à observer l'animation.

c : « groupe jauge » : pour chacun des cas suivants, observer l'animation pendant environ une minute pour répondre à l'objectif précédent. Au bout de quelques aller-retours du skateur suivre l'évolution de l'énergie cinétique au doigt.

Chaque groupe devait ensuite réaliser une série de huit activités en faisant varier les paramètres du simulateur selon les consignes de la fiche distribuée. L'ensemble des activités se trouve en annexe et un exemple est présenté ci-dessous (cf. Figure 43) :

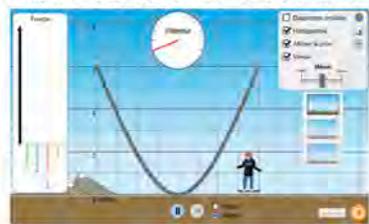
Lancer la simulation avec les conditions suivantes :

Mode : Introduction

Cocher : Histogramme, afficher la grille et vitesse.

Choisir le premier circuit

A1 : Positionner le skateur à une hauteur de 6 mètres. Observer et analyser le mouvement.



6.6.2.6 Performance d'apprentissage

A la fin des activités les participants ont répondu à un test en ligne de 17 questions sous forme de QCM (cf. Annexe 3) visant à tester :

- La mémorisation des principales notions et relations étudiées (4 questions) : il s'agissait concernant les deux grandeurs énergie cinétique et potentielle de vérifier si l'apprenant connaissait les grandeurs dépendantes et les relations liant ces énergies et les grandeurs associées.

Les 10 questions suivantes se basaient sur des situations analogues à celles étudiées dans le simulateur. A partir de captures d'écran de ce dernier, il s'agissait de vérifier si l'apprenant avait compris :

- Les liens concernant l'évolution des différentes formes d'énergie mises en jeu (6 questions).
- Le phénomène de conservation de l'énergie sans frottement et les différents transferts d'énergie mis en jeu, ainsi que l'influence des frottements sur l'évolution de l'énergie mécanique (4 questions).

La dernière partie de ce questionnaire visait à réinvestir ces notions dans un autre contexte : le mouvement d'un pendule.

- Le transfert des notions abordées dans une situation différente de celle étudiée ; évolution d'un pendule au cours du temps (3 questions).

Le calcul du coefficient α de Cronbach pour ces 17 questions a donné le résultat : $\alpha=.752$

Voici un exemple de question visant à tester la mémorisation de la relation exprimant l'énergie cinétique du skateur :

L'expression de l'énergie cinétique E_c du skateur est:

- $\frac{1}{2} m g h$
- $m.g.z$
- $mg.z^2$
- $\frac{1}{2} m g h^2$
- $\frac{1}{2} m v^2$
- $\frac{1}{2} m g.v$
- je ne sais pas répondre.

Nous allons maintenant décrire dans la partie suivante les résultats obtenus.

6.6.3 Procédure

Une semaine avant l'expérience proposée, les participants ont passé les tests permettant de constituer deux groupes similaires concernant les habiletés visuo-spatiales et le niveau de connaissances antérieures en mécanique. Ces tests ont été passés sur ordinateur PC avec un écran de 19 pouces.

L'expérience s'est déroulée la semaine suivante sur une heure de cours. Les participants se sont vus attribuer en début de séance une tablette iPad 2 et la feuille d'activités comportant les consignes de l'expérience pour chaque groupe. Ils disposaient également d'un ordinateur PC avec écran 19 pouces pour répondre aux questionnaires dans Qualtrics et visionner la vidéo initiale.

Les participants ont tout d'abord visionné la vidéo incorporée dans le formulaire Qualtrics. La consigne était : « Pour commencer cette activité, vous allez regarder la vidéo suivante une seule fois et sans prendre de note. Essayez de bien retenir les formules présentées pour les différentes énergies. » Une fois la vidéo terminée les participants devaient passer à l'écran suivant sur Qualtrics sans retour en arrière. La durée de la vidéo était de 7 minutes 30 secondes.

Une fois la vidéo terminée, les participants devaient selon leur groupe :

- Prendre en main le simulateur pour le groupe contrôle.
- Prendre en main le simulateur et suivre au doigt l'évolution du skateur ou de la jauge d'énergie potentielle en fonction du groupe expérimental.

Les participants des différents groupes ont ensuite réalisé les activités sur le simulateur à partir de la fiche d'activité donnée. Le temps n'était pas limité pour cette partie.

6.7 Hypothèses opérationnelles

Hypothèse 1 : Il est attendu que les participants des groupes produisant un geste de suivi (skateur et jauge) obtiennent de meilleurs scores au test global post-étude comparativement au groupe sans production de gestes. Cet effet est attendu dès les questions concernant les phases 1 et 2 du modèle APM et devra donc conduire à une meilleure compréhension du phénomène étudié (phases 3 à 5 du modèle APM). Un score supérieur concernant les questions liées aux phases 3 et 4 et aux questions de transfert est attendu pour les groupes de suivi (skateur et jauge) par rapport au groupe contrôle sans

geste. Enfin, une différence sur les scores est attendue, entre les groupes de suivi, en faveur du groupe de suivi du skateur. En effet, suivre le mouvement d'une personne humaine devrait permettre une meilleure incarnation de ce geste.

Hypothèse 2 : Il est donc attendu une interaction entre la condition d'apprentissage et le niveau d'habiletés visuo-spatiales dans la comparaison des résultats obtenus pour les participants. Une condition d'apprentissage avec geste devrait réduire les exigences de traitements des informations et donc réduire les effets des habiletés visuo-spatiales. En revanche en l'absence de geste, les habiletés visuo-spatiales devraient soutenir de meilleures performances d'apprentissage.

Hypothèse 3 : Cette focalisation de l'attention sur un point saillant de l'animation devrait amener à une augmentation de la durée de traitement d'information et donc de la durée d'apprentissage. On s'attend donc à une durée d'apprentissage plus importante pour les groupes produisant des gestes. Cette augmentation de la durée de traitement d'information devrait être néfaste à la mémorisation des relations en accord avec le modèle TBRS de la mémoire de travail. Il est donc attendu une baisse des scores aux questions de mémorisation pour les groupes produisant un geste de suivi (skateur et jauge) par rapport au groupe contrôle.

6.8 Résultats

6.8.1 Score aux tests post activités

Les moyennes et écarts-types concernant les scores obtenus pour les différents groupes sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Moyenne et écart-types des scores globaux à l'activité

	Groupe	Moyenne	Écart-type
Score Global	1 : contrôle	10.74	3.55
	2 : skateur	10.54	3.01
	3 : jauge	9.29	3.52

Pour mesurer l'effet de la modalité d'apprentissage et son lien avec les habiletés visuo-spatiales sur ces scores, une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle) a été réalisée. Le score *au test-card* administré en pré-test a été utilisé comme mesure des habiletés visuo-spatiales. Nous n'avons pas observé d'effet

significatif de la modalité d'apprentissage, $F(2,74) = 1.07$, $p = .349$, mais un effet significatif du niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(1,74) = 5.39$, $p = .023$, $\eta^2_{\text{partiel}} = .068$. Les scores augmentent significativement dans l'ensemble avec le niveau d'habiletés visuo-spatiales (cf. Figure 44). Nous avons également observé un effet d'interaction entre la modalité d'apprentissage et les habiletés visuo-spatiales, $F(2,74) = 3.40$, $p = .039$, $\eta^2_{\text{partiel}} = .084$. Afin d'interpréter l'interaction significative observée, les analyses des effets simples ont révélé que les habiletés visuo-spatiales avaient un effet positif sur les performances dans la condition contrôle sans production de gestes, $p < .001$, mais pas dans la condition avec suivi du geste au skateur, $p = .831$, ou encore dans la condition suivie de la jauge d'énergie cinétique $p = .694$. (cf. Figure 44). Il semble, que lorsque la condition fait appel au geste, les habiletés visuo-spatiales n'exercent plus d'effet sur les performances, alors qu'en l'absence de geste, les habiletés expliquent une partie de la variance des performances des participants.

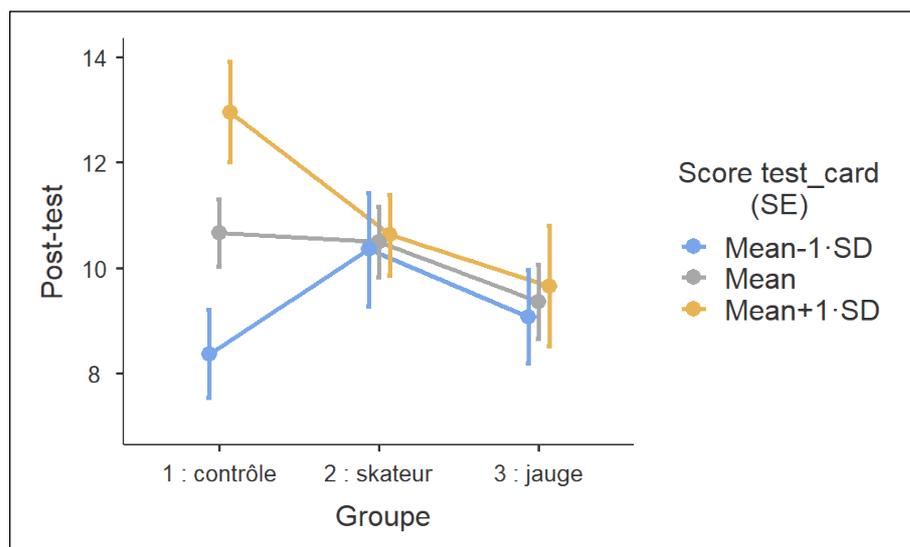


Figure 44 : Moyenne des scores au post-test selon la modalité d'apprentissage et les habiletés visuo-spatiales.

Afin de rechercher la cause de cet effet, les performances ont ensuite été analysées plus en détails selon les types de connaissances testés.

6.8.2 Questions de mise en relation des différentes formes d'énergie

Concernant les questions de mise en relation des différentes formes d'énergie (APM I-II), nécessitant la mise en relation de points saillants de l'animation assez éloignés spatialement, nous avons procédé à la même analyse : ANOVA à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Nous n'avons observé aucun effet principal de la

modalité d'apprentissage, $F(2,74) = .291, p = .749$. Cette fois, nous n'avons pas observé d'effet significatif du niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(1,74) = 3.916, p = .052$, même si l'effet est très proche du seuil de signification et semble concordant avec les résultats obtenus lors de la première analyse du score global. Nous n'avons également pas observé d'effet d'interaction entre les deux variables, $F(2,74) = 1.68, p = .193$ (cf. Figure 45).

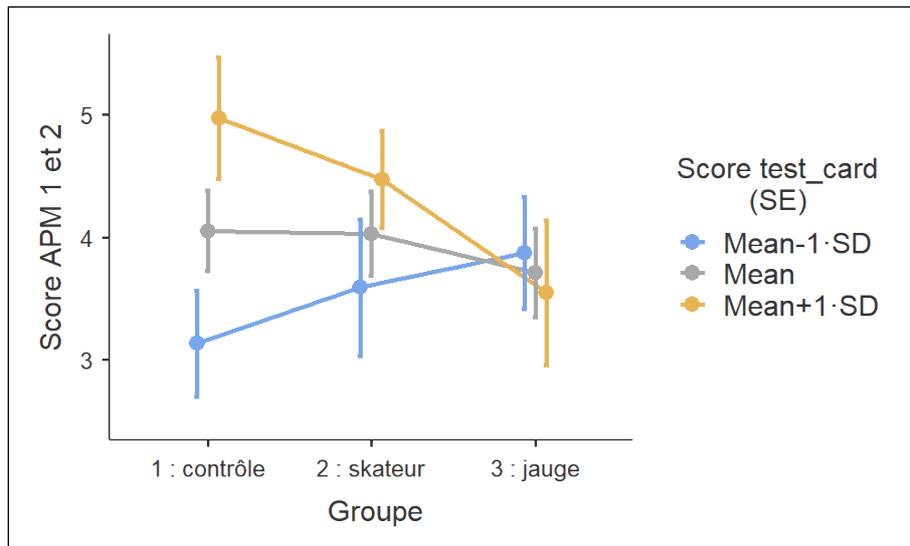


Figure 45 : Score aux questions de type APM 1 et 2 en fonction du niveau d'habiletés visuo-spatiales et du groupe.

6.8.3 Questions liées aux phases 3 et 4 du modèle APM (top-down)

Pour les questions portant sur la mise en œuvre de processus sous influence *top-down* du module APM (phases 3 et 4) nous avons également procédé à une ANOVA à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habileté spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Nous n'observons pas d'effet principal du groupe sur les scores obtenus, $F(2,74) = 1.091, p = .341$, ni d'effet principal des habiletés visuo-spatiales, $F(1,74) = .759, p = .387$. Il n'a pas été observé d'effet d'interaction entre les deux variables, $F(2,74) = 2.373, p = .100$ (cf. Figure 46).

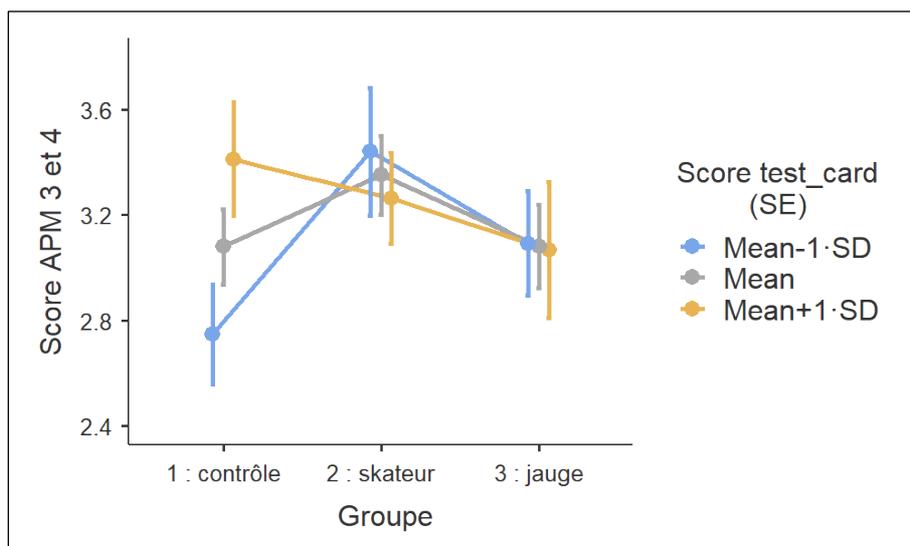


Figure 46 : Score aux questions de type APM 3 et 4 en fonction du niveau d'habiletés visuo-spatiales et de la modalité d'apprentissage.

6.8.4 Questions de transfert

Concernant le score moyen obtenu aux questions de transfert nous avons encore réalisé une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle). Nous n'avons pas obtenu d'effet principal de la modalité d'apprentissage, $F(2,74) = .279$, $p = .757$, ni d'effet principal des habiletés visuo-spatiales, $F(1,74) = 2.512$, $p = .117$. Cependant, une interaction significative est observée entre les habiletés visuo-spatiales et le type de geste produit, $F(2,74) = 6.050$, $p = .004$, $\eta^2_{\text{partial}} = .141$ (cf. Figure 47). Afin d'interpréter l'interaction significative observée, les analyses des effets simples ont révélé que les habiletés visuo-spatiales avaient un effet positif sur les performances dans la condition sans gestes imposés, $p < .001$, mais pas dans les conditions de suivi au doigt du skateur, $p = .635$ ou de suivi au doigt de la jauge d'énergie cinétique, $p = .677$. Nous retrouvons l'effet obtenu, dans la première analyse, qui concernait le score global obtenu, à savoir que lorsque la condition fait appel au geste, les habiletés visuo-spatiales n'exercent plus d'effet sur les performances, alors qu'en l'absence de geste, les habiletés expliquent une partie de la variance des performances des participants.

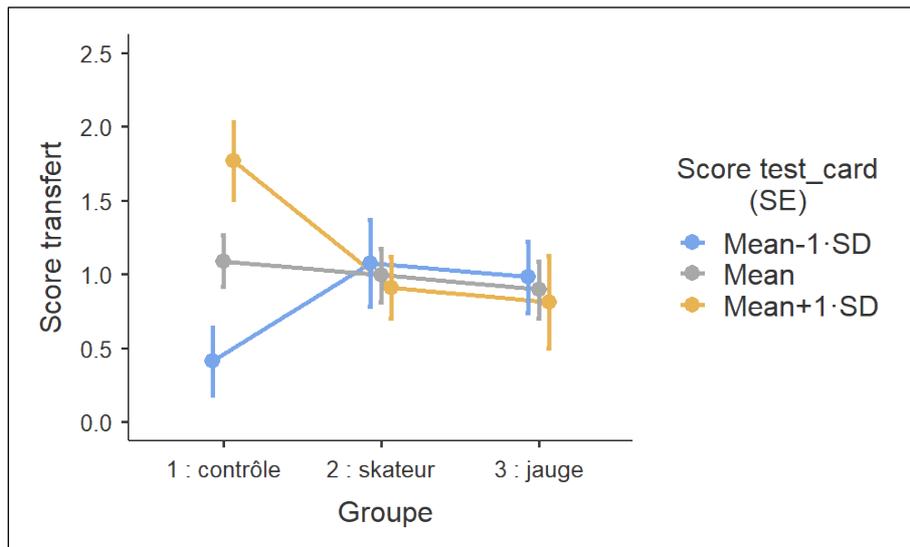


Figure 47 : Score aux questions de transfert en fonction de la condition d'apprentissage et du niveau d'habiletés visuo-spatiales.

6.8.5 Questions de mémorisation

Pour mesurer l'effet de la modalité d'apprentissage et son lien avec les habiletés visuo-spatiales sur la mémorisation des connaissances données dans la vidéo initiale, une analyse de variance à deux facteurs avec comme facteurs le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant (variable d'intervalle introduite en co-variable dans le modèle) a été réalisée. Le score au *test-card* administré en pré-test a été utilisé comme mesure des habiletés visuo-spatiales. Les résultats sont présentés en Figure 48. Nous n'avons pas observé d'effet significatif de la modalité d'apprentissage, $F(2,74) = 2.07$, $p = .133$, ni d'effet principal du niveau d'habiletés visuo-spatiales, $F(1,74) = 2.95$, $p = .095$. Nous n'avons pas obtenu d'effet d'interaction, $F(2,74) = 1.68$, $p = .193$.

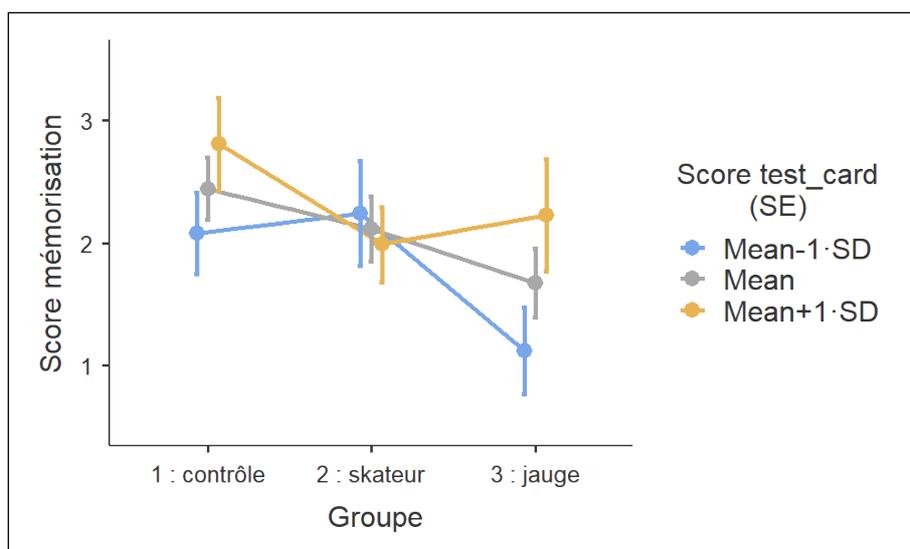


Figure 48 : Score aux questions de mémorisation selon le groupe et le score au test-cards (niveau d'habiletés visuo-spatiales)..

6.8.6 Temps sur les activités

Enfin, concernant les durées des activités sur le simulateur nous avons mené la même analyse que sur les variables dépendantes précédentes. Nous n'avons pas observé d'effet principal de la modalité d'apprentissage, $F(2,74) = 2.402$, $p = .098$, ni d'effet principal des habiletés visuo-spatiales, $F(1,74) = .944$, $p = .334$. Aucun effet d'interaction significatif n'a été observé, $F(1,74) = .280$, $p = .757$ (cf. Figure 49).

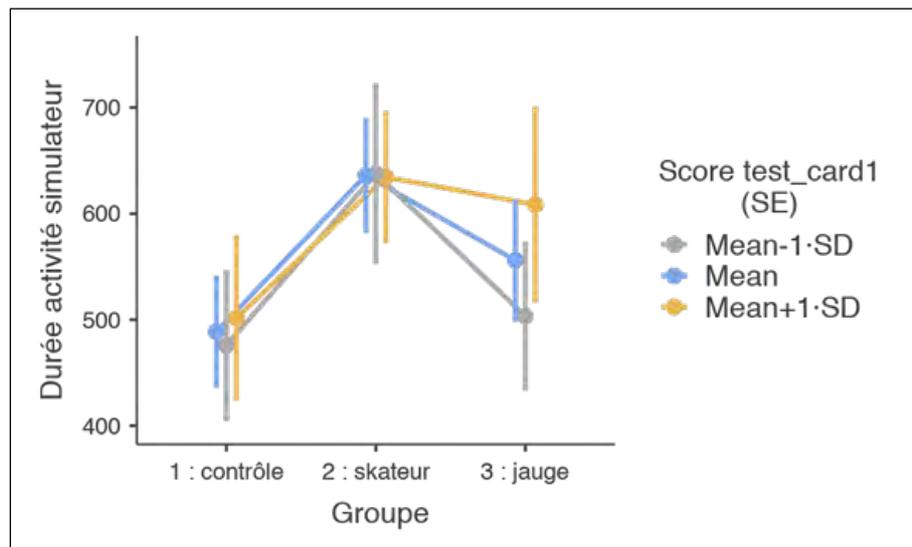


Figure 49 : Durée des activités sur le simulateur en secondes selon le groupe et le niveau d'habiletés visuo-spatiales.

Notre hypothèse sur la hausse de durée des traitements liée au geste induisant une baisse de performance de la mémorisation des relations à retenir n'est donc pas vérifiée.

6.9 Discussion

L'objectif de cette expérience était de rechercher, si un geste signifiant pour la tâche de traitement à réaliser permettait d'améliorer cette dernière, en focalisant l'attention sur des points saillants de l'animation. Cette focalisation de l'attention devait permettre de déboucher sur une meilleure conceptualisation du phénomène étudié. Le geste retenu était un geste de suivi d'un mouvement. Un des mouvements à suivre était le mouvement d'une jauge et l'autre mouvement était le mouvement d'une personne faisant du skate-board sur une rampe. Même si un geste de pointage d'une direction de l'espace est plutôt classé dans les gestes déictiques, nous avons considéré que le fait de suivre un mouvement, lui conférait dans cette expérience, un caractère iconique.

Notre première hypothèse portait sur le bénéfice d'apprentissage lié à la focalisation de l'apprenant sur les points saillants de l'animation. Dans la lignée des prédictions du modèle APM, nous attendions que cette focalisation de l'attention sur le traitement à exécuter conduise à une meilleure perception des points pertinents de la simulation (phases 1 et 2 du

modèle APM) et donc mène à une meilleure conceptualisation du phénomène étudié (phases 3 à 5 du modèle APM). Nous n'avons cependant pas observé, de manière générale, de bénéfice de la modalité d'apprentissage, ni sur les résultats globaux, ni sur les résultats aux questions correspondants aux différentes phases du modèle APM. Nous n'avons pas non plus observé, par conséquent, et contrairement à notre hypothèse, un bénéfice supérieur du geste de suivi au doigt du skateur par rapport au geste de suivi au doigt de la jauge. Le fait de suivre un mouvement réel humain n'a donc pas été un avantage dans cette expérience. Nous avons observé par contre comme dans nos deux expériences précédentes, un effet positif des habiletés visuo-spatiales sur la réussite à la tâche d'apprentissage : les meilleurs scores sont obtenus par les personnes disposant des meilleures habiletés visuo-spatiales.

Notre deuxième hypothèse était que les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales tirent plus bénéfice de ce geste. Nous attendions donc une interaction entre la modalité d'apprentissage et le niveau d'habiletés visuo-spatiales et ce pour les différentes catégories de questions posées. Nous observons bien cette interaction dans l'analyse des scores globaux concernant l'apprentissage. L'introduction du geste a permis de niveler l'effet des habiletés visuo-spatiales des participants. En effet, les habiletés visuo-spatiales n'expliquent une partie de la variance des résultats obtenus que dans la modalité d'apprentissage du geste. Mais sur quel type de questions cet apport du geste a réellement aidé les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales ? Nous ne retrouvons l'interaction significative précédente que dans les questions de transfert. Cela peut sembler étonnant au premier abord. Mais si nous regardons les résultats sur les différentes questions relatives aux différentes phases correspondant au modèle APM 1 et 2 d'une part, et 3 et 4 d'autre part, nous observons un pattern de résultats similaires. Les bases de l'interaction significative que nous obtenons dans les questions de transfert semblent bien se construire durant ces différentes phases. On peut donc faire l'hypothèse, que la production de gestes pour les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales, permet à ces personnes de construire un modèle mental de la connaissance, légèrement plus abouti. Cela rendrait ce modèle plus facilement transposable dans une situation différente mettant en jeu le même concept.

Notre troisième hypothèse portait sur la conséquence du geste introduit sur la mémorisation des informations à retenir. Une conséquence envisagée de l'introduction de ces gestes dans la tâche était l'augmentation de la durée de traitement des informations inhérentes au suivi du mouvement sur plusieurs aller-retours. Si tel était le cas, en accord avec le modèle TBRS, cela risquait d'impliquer une baisse de la mémorisation des formules à acquérir, une

partie des ressources attentionnelles étant allouée au traitement du suivi du skateur ou de la jauge d'énergie. Nous n'avons pas obtenu de différence significative liée à la modalité d'apprentissage sur la durée de l'expérience et donc pas de différence significative sur les questions de mémorisation liées à cette modalité. Nous n'obtenons pas non plus d'effet des habiletés visuo-spatiales sur ces grandeurs, ni interactions entre elles. Même si elles ne sont pas significatives, les moyennes obtenues semblent cependant varier en ce sens. Nous aurions peut-être dû imposer une durée de production du geste plus importante. Cela rejoint notre conclusion de l'expérience précédente, sur une absence visible de résultats liée à une production de gestes limitée dans le temps, pour des gestes de si petite amplitude.

Discussion générale

7.1 Rappel de objectifs

L'objectif de ce travail était d'évaluer l'impact de l'utilisation de tablettes tactiles dans diverses situations d'apprentissage. Contrairement à la majorité des études qui envisagent de manière globale l'objet tablette, ce travail était centré sur l'impact de l'interaction Multitouch dans diverses situations d'apprentissages. Le premier objectif de recherche de ce travail était donc de rechercher une influence du geste réalisé sur une tablette tactile, selon la nature de ce geste, sur l'activité d'apprentissage.

Pour éviter toute variabilité liée à la nature de la tâche et au domaine d'étude, un domaine spécifique d'apprentissage a été choisi : l'étude de phénomènes dynamiques en physique, dans un contexte particulier qu'est l'utilisation de simulations. Le caractère spatial, dénominateur commun entre la production de gestes lors de l'interaction Multitouch et les habiletés à mettre en œuvre dans l'étude de phénomènes dynamiques, a guidé ce choix. Le lien entre l'influence des gestes produits sur la tablette et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant est donc un deuxième objectif de recherche de ce travail.

Quel peut-être l'intérêt de ce type de travail ? Trois points ont guidé le choix de ce travail et nous les rappelons brièvement, ci-après.

Premièrement, pour justifier l'intérêt d'introduire des tablettes dans le milieu éducatif, l'aspect naturel de l'interaction est souvent évoqué. Il est souvent évoqué la facilité de navigation dans des interfaces tactiles Multitouch. L'objectif de ce travail était de savoir si ce ressenti s'accompagnait d'une hausse des performances des apprenants dans l'acquisition des concepts à étudier. Le premier point visait donc à déterminer, du moins dans le domaine de l'apprentissage de phénomènes dynamiques avec des animations, s'il est raisonnable de déclarer que la nature de l'interaction Multitouch permet de mieux appréhender le phénomène étudié ?

Le deuxième point concernait les personnes susceptibles de bénéficier de l'utilisation de gestes dans ces activités d'apprentissages. Un lien entre les résultats obtenus et les habiletés visuo-spatiales des apprenants était donc recherché dans ce travail. Dans la continuité du premier point, le deuxième intérêt de cette thèse est de rechercher un bénéfice de ce type d'interaction en sciences pour des personnes présentant de faibles habiletés visuo-spatiales. En effet, les habiletés visuo-spatiales étant un prédicteur de réussite en sciences, tout apport d'une technologie qui permettrait de pallier à un déficit d'habiletés visuo-spatiales devrait mener à un meilleur apprentissage dans ce type de domaine.

Le troisième point est plus théorique et concerne le cadre théorique sous-jacent qui pourrait être évoqué pour expliquer ce bénéfice : la cognition incarnée. L'interaction Multitouch implique en effet une action motrice : la réalisation d'un geste. Nous avons dans la partie théorique évoqué nos doutes concernant la vision radicale de cette approche incarnée de la cognition. En effet, cette théorie est souvent mise en œuvre pour l'étude d'apprentissage procéduraux impliquant des mouvements du corps. Des effets bénéfiques du geste ont bien été mis en évidence dans des apprentissages de concept. Cependant le plus souvent, le geste produit venait en complément de la parole chez des jeunes enfants. L'intérêt de travail résidait donc dans la recherche d'un bénéfice du geste seul, dans un environnement multimédia et portant sur des apprentissages conceptuels avec des adolescents et des adultes. A notre connaissance, le nombre d'études ayant mis en évidence de tels bénéfices du geste dans ces circonstances est relativement restreint. L'objectif était également d'essayer de comprendre les mécanismes cognitifs impliqués lors de la réalisation de ces gestes dans le cadre d'une approche cognitiviste.

Pour répondre à ces trois points, trois études ont été construites permettant de faire varier la nature de geste (gestes iconiques ou métaphoriques) et permettant d'envisager le geste soit comme une source complémentaire d'encodage d'informations venant en complément des stimuli visuels, soit comme un modérateur de l'attention de l'apprenant. Ces études devaient de plus permettre de faire le lien entre les habiletés visuo-spatiales des apprenants et les effets obtenus du geste.

La première étude permettait donc d'envisager l'interaction comme une modalité facilitant l'encodage d'informations de nature spatiale : un geste iconique de rotation a donc été utilisé dans cette approche. Cette expérience devait également permettre d'établir un lien entre les habiletés visuo-spatiales des participants et l'effet du geste sur le développement de ces habiletés. Pour étudier spécifiquement ce dernier point, une tâche purement spatiale de rotation d'objets dans l'espace a été mise en œuvre. Cette tâche ne mettait donc pas volontairement en jeu la manipulation de concepts théoriques dont la compréhension aurait pu venir interférer sur les résultats obtenus. Dans ce cadre, l'interaction Multitouch a été comparée à deux autres modalités d'interaction : le clavier et la souris afin d'explorer également la modalité de proximité entre le geste réalisé et la conséquence de ce dernier, à savoir ici la mise en rotation d'un objet. Enfin, une modalité de rotation automatique permettait de mesurer l'effet de l'interaction indépendamment de sa nature.

Dans la deuxième expérience le geste était de nouveau envisagé comme une modalité complémentaire d'encodage d'informations. Cette fois, le bénéfice dans la compréhension

d'un concept était envisagé : comprendre que l'allure d'un mouvement résultait de la composition de deux mouvements distincts. Ces mouvements étaient des mouvements de projectiles dans l'air. En complément d'un geste iconique, un nouveau type de geste a donc été introduit : le geste métaphorique. La réalisation correcte de ce geste était liée à la mise en application du concept étudié, ce qui nous l'avons dit a pu interférer avec l'effet possible de l'action motrice.

Pour remédier à cela, dans la troisième expérience un simple geste de suivi a été introduit ce qui rendait sa réalisation correcte, indépendamment de la compréhension du phénomène étudié. De plus, en complément d'une source d'encodage d'information, le geste était également envisagé comme un modulateur de l'attention de l'apprenant. Deux gestes iconiques de suivi de mouvement ont donc été introduits. Un des gestes de suivi concernait le mouvement de suivi d'une personne sur un skate, alors que le deuxième geste de suivi concernait le mouvement d'une jauge représentant une quantité d'énergie. On faisait donc également varier le degré d'incarnation du même geste selon la nature de l'objet à suivre.

Détaillons maintenant les principaux résultats obtenus.

7.2 Principaux résultats

7.2.1 Liens entre interaction Multitouch, résultats d'apprentissage et habiletés visuo-spatiales

La première des trois expériences a permis de vérifier que les activités spatiales pouvaient être entraînées. Cela confirme les résultats d'études antérieures. (Martin-Gutierrez & Contero, 2012 ; Sanchez, 2012). Dans cet entraînement une modalité d'interaction consistant à pouvoir orienter un objet dans l'espace afin de mieux comparer deux objets était proposée. Cette possibilité d'interagir sur l'objet a rendu l'entraînement plus bénéfique qu'avec une modalité de rotation automatique de l'objet pour le développement des habiletés visuo-spatiales des apprenants. Cette rotation automatique s'accompagnait, en effet, d'un recours plus important à la rotation mentale. La nature de l'interaction n'a par contre montré aucun bénéfice du geste Multitouch par rapport à des interactions clavier et souris. On peut donc affirmer que les bénéfices obtenus sont liés à la mise en rotation de l'objet qui limite l'usage d'une stratégie coûteuse de rotation mentale, mais pas à la nature de cette interaction. Cette première expérience nous a permis de mettre en évidence, un effet, entre la production d'un geste et le niveau d'habiletés visuo-spatiales du participant. En l'absence d'interaction et donc de production de gestes, les habiletés visuo-spatiales expliquaient une partie significative de la variance observée. Ce n'était plus le cas quand l'utilisateur pouvait interagir avec l'objet à mettre en rotation. La nécessité moindre de recourir à la rotation

mentale dans les conditions avec interaction peut logiquement expliquer ce résultat. Malgré tout, nous retrouverons cet effet nivelant du geste pour les personnes à faibles habiletés visuo-spatiales dans l'expérience trois.

Les expériences deux et trois permettaient de comparer les bénéfices en termes d'apprentissage de l'interaction Multitouch sur des concepts en mécanique. Contrairement à la première expérience, il n'a pas été mis en évidence d'effet de cette interaction sur les résultats en comparaison d'une situation sans interaction (observation d'une vidéo). Si l'on compare maintenant les résultats obtenus en tenant compte du niveau d'habiletés visuo-spatiales de départ des apprenants, les deux expériences présentent des résultats différents.

Dans l'expérience deux, il n'a pas été observé d'effet du geste en termes de résultats d'apprentissage pour les personnes disposant de faibles habiletés visuo-spatiales. Par contre, dans l'expérience trois, nous avons observé un rôle nivelant du geste : le geste de suivi a semblé limité l'impact du rôle joué par les habiletés visuo-spatiales dans les résultats obtenus. Cette interaction entre les habiletés visuo-spatiales et la condition d'apprentissage a été observée dans le score global d'apprentissage et dans les questions de transferts de cet apprentissage dans un contexte différent. Dans l'expérience trois qui met en œuvre des concepts plus abstraits que dans l'expérience deux, la production de gestes a semble-t-il permis aux personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales de ne pas être pénalisées par rapport aux personnes ayant de fortes habiletés visuo-spatiales.

7.2.2 Interaction Multitouch, nature du geste et processus cognitifs.

7.2.2.1 Effet du geste sur l'encodage d'information

Les expériences une et deux avaient également pour but de considérer le geste réalisé comme une modalité supplémentaire d'encodage d'informations. Les informations gestuelles devaient permettre de compléter les informations visuelles afin d'obtenir une représentation plus réaliste du mouvement étudié. La première expérience se limitait à la reconnaissance de la forme d'un objet, reconnaissance liée à sa position dans l'espace. Un geste iconique, similaire à celui qui serait réalisé sur un objet réel, a donc été introduit. Dans la deuxième expérience, la trajectoire obtenue résultait de la superposition de deux trajectoires simultanées. Un geste métaphorique représentant la trajectoire verticale, dont les effets sont observés dans le mouvement réel, a donc été introduit. Dans un cas, comme dans l'autre, aucun effet du geste n'a permis de mettre en évidence un intérêt de réaliser ce geste en complément de la modalité visuelle pour les tâches demandées.

7.2.2.2 Effet du geste sur l'attention

Dans l'expérience trois, le geste était introduit dans l'idée de focaliser l'attention de l'apprenant sur les points pertinents de l'animation. L'hypothèse était qu'en focalisant l'attention, on obtiendrait de meilleurs résultats sur la compréhension du phénomène. Nous venons de décrire le rôle qu'avait joué cette focalisation de l'attention selon le niveau d'habileté spatiale des participants. Cette focalisation de l'attention ayant des chances d'augmenter la durée de l'activité, les scores aux questions de mémorisation devaient de plus être impactés défavorablement, conformément au modèle TBRS de la mémoire de travail. Nous n'avons pas observé ce résultat.

7.2.3 Bilan des résultats

Les différents résultats obtenus ne nous permettent donc pas de trancher sur le mécanisme cognitif impliqué lorsqu'un geste est produit. Avec nos résultats, il semble difficile d'envisager le geste comme une modalité d'encodage d'informations susceptible d'enrichir suffisamment la représentation de l'apprenant pour permettre un meilleur apprentissage, tout du moins dans ce contexte d'étude. Il semblerait par contre, plus plausible, à la vue des résultats de l'expérience 3 d'envisager plutôt le geste comme jouant un rôle de focalisation de l'attention. Cela semble permettre de limiter la mise en jeu des habiletés visuo-spatiales dans la réalisation de tâche. Ce phénomène pourrait donc être profitable pour les personnes ayant de faibles habiletés visuo-spatiales.

7.3 Limites des études

Nous avons pris le soin en début de ce travail de cadrer le contexte de l'étude. Lors de la réalisation des expériences les différentes variables susceptibles d'influencer les résultats obtenus ont été contrôlées. Malgré ces précautions, nous avons pu relever après-coup des défauts aux études menées qu'il convient d'énumérer ici.

Le premier point concerne l'action motrice étudiée. Il faut noter qu'une interaction Multitouch est une action motrice qui présente un degré d'incarnation faible (pas de retour haptique, surface plane...). Il nous semble important de discuter ce point et nous le détaillerons dans le paragraphe suivant. Il est donc possible que ce type d'action motrice nécessite une répétition du nombre de gestes plus importante que dans le cas d'une interaction sur une interface tangible par exemple. De plus, nos expériences ont été limitées par la durée des heures de cours qui rendaient difficile la multiplication des situations d'apprentissage. Enfin, notre expérience deux ne permettait pas aux élèves d'avoir un feedback sur la justesse du geste réalisé.

Les points suivants que nous voyons comme limite à nos études sont liés aux participants. Le premier point concerne le niveau d'habiletés visuo-spatiales des étudiants des trois études. Si l'on ramène sur 20 les notes obtenues par les apprenants aux différents tests d'habiletés visuo-spatiales, nous obtenons des moyennes pour chaque expérience de $M = 7.46$, $E.T. = 4.49$ pour l'expérience 1, $M = 8.22$, $E.T. = 4.42$ pour l'expérience 2 et $M = 6.0$, $E.T. = 4.41$ pour l'expérience 1. Ces résultats sont relativement faibles mais concordants avec ceux obtenus par Albaret et Aubert (1996). La moyenne de leurs résultats, ramenée sur 20, était $M = 6.77$, $E.T. = 3.46$. Ce niveau d'habiletés visuo-spatiales faibles ne permet peut-être pas de mettre en évidence un effet général du geste sur l'apprentissage, si cet effet est peu important. Les difficultés à lier les différentes informations spatiales étaient, peut-être, trop grandes pour une partie des participants.

Une autre possibilité est la présence de fortes disparités individuelles dans la prise d'informations pour les participants des différents groupes. Mason, Tornatora, et Pluchino (2013) ont montré chez des enfants de dix ans l'existence de patterns différents de prise d'informations dans la lecture d'un document scientifique présentant des textes et des images. Ces multiples patterns ont amené à des résultats de compréhension du texte différents. Même si le public de nos études était plus âgé, il est possible que la difficulté introduite par le traitement d'informations dynamiques avec des simulations ait conduit à l'existence là aussi de différents patterns de prise d'informations avec des prises en compte différentes du geste. Cela a pu amener à masquer d'éventuels effets des gestes produits.

Enfin, il nous faut évoquer un dernier point concernant le contexte des tâches deux et trois. Les élèves des expériences deux et trois étaient des élèves de lycée désignés pour la passation des expériences. Pour rendre la tâche le plus écologique possible, nous avons choisi un contexte scolaire avec un enseignant du domaine clairement identifié comme tel par les élèves. Cependant, ce dernier n'était pas leur enseignant habituel dans l'année et la tâche n'était pas évaluée dans leur cursus scolaire : leur implication a donc pu être toute relative. Enfin, la durée de passation de ces deux études correspondait à une séance de travaux pratiques. Cette durée n'était donc pas suivie d'une phase de cours et de mise en œuvre d'exercices en classe. Ces phases sont pourtant nécessaires à l'élaboration d'un modèle mental robuste des concepts étudiés et habituellement réalisées dans le cursus. Il aurait été intéressant de pouvoir réaliser ces phases et de refaire, ensuite, le même type de post-test que ceux réalisés à la fin de la manipulation.

Ces limites étant posées, nous allons maintenant évoquer les perspectives de ce travail tout d'abord en tant que réflexion sur les modèles théoriques convoqués. Ensuite, nous

terminerons cette discussion sur les perspectives concernant l'utilisation des tablettes en physique et les perspectives sur la formation des enseignants.

7.4 Perspectives

7.4.1 Limites de la cognition incarnée pour les connaissances conceptuelles.

Est-il possible d'évoquer la cognition incarnée dès lors qu'une action motrice est réalisée ? Sans nier les bénéfices possibles de l'action motrice sur la cognition, leur impact sur l'apprentissage est-il indépendant de la nature de ce dernier (connaissance procédurale ou conceptuelle) ou de l'âge des participants (jeunes enfants ou adolescents et adultes) ? Nous allons maintenant aborder ces questions.

7.4.1.1 Degré d'incarnation d'une action motrice

Dans une revue de littérature récente intitulée, *The role of embodied cognition for transforming learning*, Fugate, Macrine, et Cipriano (2019) dressent un panorama des résultats de différentes études impliquant des actions motrices dans différents domaines. Ils proposent donc des recommandations pour introduire de telles actions dans l'enseignement. Précisons tout d'abord que ces auteurs n'ont pas une vision radicale de la cognition incarnée. Les quelques citations suivantes en attestent :

- Même si nous croyons que le langage (y compris les mots individuels) est souvent incarné, nous ne suggérons pas qu'il en soit toujours ainsi (Fugate et al., 2019, p.6 notre traduction).
- Bien que la cognition incarnée soit une théorie pour comprendre l'apprentissage, nous reconnaissons que certaines informations pourraient être mieux acquises par d'autres approches (Fugate et al., 2019, p.7 notre traduction).

Dans le domaine qui nous intéresse, l'apprentissage de concepts en physique avec des adolescents, des résultats positifs sur l'apprentissage, liés à la production d'actions motrices, ont été observés. (Johnson-Glenberg, Megowan-Romanowicz, Birchfield, & Savio-Ramos, 2016; Johnson-Glenberg & Megowan-Romanowicz, 2017). Il faut cependant noter que dans ces expériences, les tâches à réaliser mettaient en jeu des mouvements amples du corps ou des interactions sur des objets réels comme faire tourner des roues pour appréhender la notion de moment de forces. La mobilisation du corps dans ces exemples est bien plus importante que dans une simple interaction Multitouch. Johnson-Glenberg et al., (2016) distinguent d'ailleurs dans leurs études le degré d'incarnation d'une action : *low embodiment vs high embodiment*. Les conditions qui permettent d'obtenir les meilleurs effets sur l'apprentissage

présentent des gestes de grande envergure, sur des objets réels et dans des environnements bien plus immersifs que lors de l'utilisation d'une simple simulation sur Tablette (*high embodiment*). Ces résultats sont bien présentés dans l'analyse de Fugate et al., (2019). Dès lors, ces auteurs proposent la recommandation suivante concernant l'apprentissage des sciences :

« Nous recommandons que les étudiants des domaines des sciences, technologie et mathématiques s'engagent dans diverses modalités d'apprentissage qui mettent en jeu des domaines sensoriels et moteurs variés. Ces modalités pourraient comprendre l'apprentissage par projet et la technologie haptique (par exemple, des tablettes à écran tactile avec rétroaction dans les domaines visuel et auditif). » (Fugate et al., 2019, p.10 notre traduction).

Les auteurs évoquent, certes, une rétroaction dans les domaines visuels et auditifs. Nous avons évoqué dans notre deuxième expérience le fait que l'inefficacité du geste, utilisé en Multitouch, pouvait être due à l'absence de cette rétroaction. Mais force est de constater que les simulations existantes et massivement utilisées en classe n'ont pas intégré dans leur interaction des gestes spécifiques et des rétroactions sur la réalisation de ces gestes. Dès lors, le caractère incarné de l'interaction est très faible. Même en mettant en œuvre des stratégies didactiques pour introduire des gestes dans l'étude, notre travail a montré l'inefficacité de ces derniers avec des apprentissages conceptuels. Sans remettre en cause la conclusion de Fugate et al., (2019) il nous semble qu'il est important de préciser aux enseignants que si bénéfique du geste il doit y avoir, lié à une interaction de type Multitouch, il sera probablement obtenu sur des apprentissages de type procéduraux et pas dans l'acquisition de concepts. Il existe d'ailleurs diverses applications pour tablettes, pour réaliser des gestes dans des apprentissages procéduraux, avec une rétroaction sur la réalisation des gestes. Les domaines concernés sont par exemple la réalisation de dissections ou l'apprentissage du piano.

7.4.1.2 Cognition incarnée et âge

Nous allons dans cette partie évoquer l'âge des participants. Toujours dans leurs recommandations, Fugate et al., (2019 p.10, notre traduction) affirment :

« Ces stratégies d'enseignement peuvent être adaptées et généralisées pour soutenir l'apprentissage des sciences et des mathématiques en classe par les jeunes enfants et les élèves plus âgés. »

Il nous faut encore relativiser cette affirmation suite à ce travail. Notre travail avec des adolescents et de jeunes adultes n'a pas permis de mettre en évidence de bénéfice du geste. Il est possible de penser comme nous l'avons évoqué que le faible degré d'incarnation seul permet d'expliquer cette absence de résultat. En effet, les concepts à étudier se complexifiant

avec l'âge, l'acquisition de ces derniers demanderait une mobilisation plus importante du corps pour tirer parti des bénéfices des actions motrices.

C'est probable mais pour autant, les résultats évoqués dans notre revue de littérature sur les gestes nous laissent à penser qu'il pourrait être intéressant de creuser une autre piste. En effet, bon nombre de ces études ont envisagé le geste comme complémentaire au langage. Dans leur étude sur l'apprentissage des mathématiques Gunderson et al., (2015) ont montré que le geste venait soutenir le langage et pallier au déficit lexical des jeunes enfants. En d'autres termes, le geste ne venait pas aider à la compréhension du concept, mais aidait à l'expression de ce dernier par les enfants. Or, le développement du langage est lié au développement des fonctions exécutives. Derrière ce terme générique se cache toute une série d'habiletés cognitives indispensables aux apprentissages scolaires comme la planification, la résolution de problèmes, les possibilités d'abstraction, le contrôle attentionnel et l'inhibition, la flexibilité cognitive ou encore les capacités de mémoire de travail (MDT) (Roy, Gall, Roulin, & Fournet, 2012). Ces habiletés cognitives sont sous le contrôle du cortex préfrontal et fortement liés à la maturation de ce dernier qui se fait lentement, sur environ les vingt premières années de la vie. Dès lors, ne pourrait-on envisager qu'avec la maturation du cortex préfrontal et donc l'âge des apprenants, d'autres mécanismes plus efficaces viennent supplanter les effets du geste sur l'apprentissage ? L'apprentissage deviendrait ainsi, de plus en plus sous influence de processus *top-down* au profit de mécanismes *bottom-up*, au fur et à mesure que l'âge des apprenants avance. Sans renier l'existence de mécanismes cognitifs liés aux mouvements du corps, cela expliquerait les difficultés de la cognition incarnée à s'appliquer à l'apprentissage de concepts avancés. Pour ces derniers des mécanismes plus efficaces, développés avec l'expérience, rentreraient en jeu avec l'âge des participants. Si ce point pouvait être mis en évidence, alors l'utilisation des tablettes pour des apprentissages conceptuels serait à privilégier avec des jeunes enfants (niveau primaire) à la condition que des ressources éducatives implémentent des gestes adéquats.

7.4.2 Limites des modèles de mémoire pour l'apport des actions motrices.

Nous allons maintenant évoquer une difficulté rencontrée lors de la réalisation de notre travail pour essayer de déterminer les mécanismes impliqués dans l'utilisation de gestes dans l'apprentissage. Le premier modèle de mémoire de travail sur lequel nous avons travaillé est le modèle de Baddeley et comme nous l'avons déjà évoqué ce modèle ne prend pas en compte les actions motrices. Nous avons cependant trouvé dans notre expérience une et trois une interaction entre le degré d'actions motrices et le niveau d'habiletés visuo-

spatiales. Une réflexion sur une possible interaction entre le calepin visuospatial du modèle de Baddeley et une composante rajoutée, liée à l'encodage d'informations issus d'actions motrices, pourrait être envisagée. Nous avons également discuté la difficulté d'expliquer les mécanismes attentionnels avec le modèle de Baddeley. Nous nous sommes donc tournés vers le modèle TBRS. Ce dernier met bien l'attention, et notamment son partage entre les mécanismes de traitement de l'information et de mémorisation, au cœur du fonctionnement de la mémoire de travail. Mais, contrairement au modèle de Baddeley, il ne s'intéresse pas aux entrées sensorielles d'information en mémoire de travail. Reprenons l'hypothèse que nous avons faite d'un effet bénéfique possible du geste pour de jeunes enfants qui pourrait être remplacé par des mécanismes cognitifs plus développés à partir de l'adolescence. Suite à ce que nous venons de développer, sur les limites des modèles étudiés, il nous semblerait intéressant de réfléchir à un modèle de mémoire impliquant les entrées motrices et des mécanismes régulateurs sous contrôle de l'attention. A la fin de ce travail, nous venons de découvrir un modèle allant dans ce sens proposé par Sepp, Howard, Tindall-Ford, Agostinho et Paas (2019). Dans ce modèle, présenté schématiquement, ci-dessous (cf. Figure 50), les auteurs envisagent un modèle de mémoire de travail, basé sur une répartition de l'attention entre les différentes modalités d'entrée d'informations qui change et s'ajuste constamment d'une modalité à l'autre, de la manière la plus efficace pour l'individu, compte tenu de la tâche en cours et de son expérience antérieure.

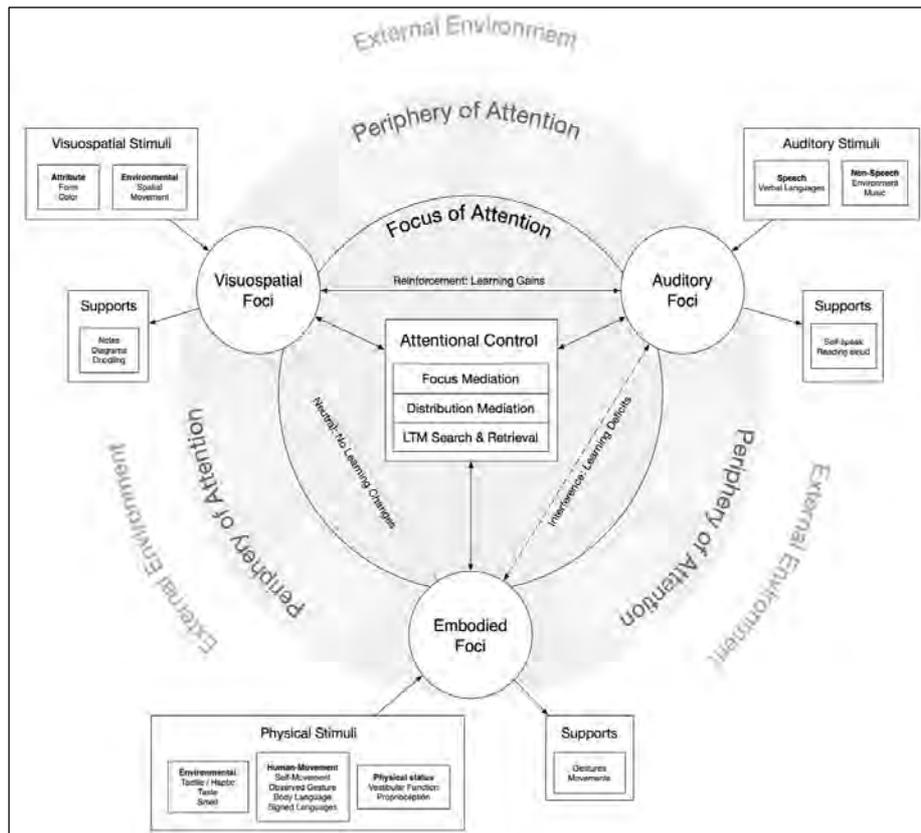


Figure 50 : Modèle de la mémoire de travail tiré de Sepp et al. (2019)

Il nous semblerait intéressant de poursuivre ce travail, en partant de ce modèle, de tester l'hypothèse que nous avons faite liée à l'âge des apprenants pour expliquer la difficulté à trouver des bénéfices des actions motrices pour l'acquisition de connaissances conceptuelles chez des adolescents et adultes.

Nous allons maintenant terminer ce travail en nous recentrant sur les préoccupations d'un enseignant de physique disposant de tablettes tactiles, en nous demandant quels peuvent être les bénéfices de l'utilisation des tablettes tactiles en physique et de manière plus générale, quelle doit être la place de la cognition incarnée dans la formation des enseignants.

7.4.3 Implications de ce travail dans la classe.

7.4.3.1 L'utilisation des tablettes tactiles en Physique

Quelles réponses donner à un enseignant demandant l'intérêt d'utiliser la tablette tactile en classe ? Après ce que nous avons détaillé dans la première partie de ce travail concernant les conclusions tirées d'études trop générales, il nous semblerait délicat de faire de même à ce stade. Tout au plus, nous pourrions dire suite à ce travail qu'il ne faut probablement pas s'attendre à obtenir des effets bénéfiques de l'interaction Multitouch sur les progrès des élèves dans l'étude de phénomènes dynamiques. Cependant, à condition que l'application utilisée soit construite en permettant d'interagir directement sur du contenu avec

des gestes pertinents pour la compréhension du concept, la tablette pourra peut-être aider les personnes ayant des habiletés visuo-spatiales faibles. Mais, ce type d'apprenant tirera probablement beaucoup plus de bénéfices d'une explication personnalisée de l'enseignant. Cela ne veut pas dire pour autant que l'utilisation des tablettes tactiles est inutile et cet enseignant trouvera certainement des bénéfices liés à la mobilité de l'outil, à sa forte autonomie ou à d'autres caractéristiques qui lui permettront d'intégrer cet outil de manière bénéfique dans la construction de son scénario pédagogique.

7.4.3.2 L'intégration de la cognition incarnée dans la formation des enseignants

Le deuxième point qu'il nous semble important de discuter est l'introduction de la cognition incarnée dans la formation des enseignants. Des auteurs envisagent les implications des résultats de la cognition incarnée pour la classe. (Fugate et al., 2019 ; Shapiro & Stolz, 2019). Même si nous pensons qu'il est très important de rendre accessible aux enseignants les résultats de recherche et de mettre en œuvre les conditions afin que ces résultats puissent avoir des répercussions positives dans la classe, il nous semble qu'il mérite d'être prudent avec les résultats évoqués. L'introduction de ces résultats devrait être faite en prenant des précautions sur la nature des connaissances pouvant tirer bénéfice de l'observation ou de la réalisation d'actions motrices. Ce domaine de recherche est relativement récent et nous avons détaillé les difficultés de la cognition incarnée à expliquer l'acquisition de connaissances conceptuelles. Il nous semble, à ce stade, plus important de combler le déficit d'informations des enseignants concernant les résultats obtenus dans des domaines comme la métacognition ou sur les stratégies d'apprentissages. Ces résultats, aux effets robustes et répliqués pourraient avoir des bénéfices immédiats s'ils étaient mis en application dans la classe.

Bibliographie

- Adams, D. M., Stull, A. T., & Hegarty, M. (2014). Effects of mental and manual rotation training on mental and manual rotation performance. *Spatial Cognition & Computation, 14*(3), 169-198. <https://doi.org/10.1080/10881108.2014.911111>
- Albaret, J. M., & Aubert, E. (1996). Etalonnage 15-19 ans du test de rotation mentale de Vandenberg. *Evolutions psychomotrices, 34*, 206-209. Repéré à : <http://www.psychomot.ups-tlse.fr/albaret34.pdf>
- Alibali, M. W., & Nathan, M. J. (2012). Embodiment in Mathematics Teaching and Learning: Evidence From Learners' and Teachers' Gestures. *Journal of the Learning Sciences, 21*(2), 247-286. <https://doi.org/10.1080/10508406.2011.611446>
- Amadiou, F., Pecoste, C., Mariné, C., Van de Leemput, C., & Lescarret, C. (2016). How experienced tasks with tablets effects of studying tasks compatibility with tablets on their acceptance. In F. M. Mendes Neto, R. de Souza, & A. S. Gomes (Eds.), *Handbook of research on 3-D virtual environments and hypermedia for ubiquitous learning* (pp. 338-361). IGI Global. <http://doi.org/10.4018/978-1-5225-0125-1.ch014>.
- Anthony, L., Brown, Q., Nias, J., & Tate, B. (2013). Examining the Need for Visual Feedback During Gesture Interaction on Mobile Touchscreen Devices for Kids. In *Proceedings of the 12th International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 157-164). New York, NY, USA : ACM. <https://doi.org/10.1145/2485760.2485775>
- Araujo, I. S., Veit, E. A., & Moreira, M. A. (2008). Physics students' performance using computational modelling activities to improve kinematics graphs interpretation. *Computers & Education, 50*(4), 1128-1140. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2007.08.001>
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer : A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences, 4*(11), 417-423. [https://doi.org/10.1016/S0969-1301\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S0969-1301(00)01538-2)
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In G. H. Bower (Ed.), *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, pp. 47-89). Cambridge, MA, USA : Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Bara, F., & Tricot, A. (2017). Le rôle du corps dans les apprentissages symboliques : Apports des théories de la cognition incarnée et de la charge cognitive. *Recherches sur la philosophie et le langage, 33*, 219-249.

- Barrouillet, P., Bernardin, S., & Camos, V. (2004). Time constraints and resource sharing in adults' working memory spans. *Journal of Experimental Psychology: General*, 133(1), 83 -1005. <https://doi.org/10.1037/0096-1005.133.1.83>
- Barrouillet, P., Bernardin, S., Portrat, S., Vergauwe, E., & Camos, V. (2007). Time and cognitive load in working memory. *Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition*, 33(3), 570 -593. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.33.3.570>
- Barrouillet, P., & Camos, V. (2007). Le développement de la mémoire de travail. In J. Lautrey (Éd.), *Psychologie du développement et de l'éducation* (pp. 51 -86) : PUF.
- Bauer, P. J., & Varga, N. L. (2016). Les neurosciences cognitives du développement de la mémoire : Implication pour les sciences de l'éducation. In E. Tardif & P.-A. Doudin (Éds), *Neurosciences et cognition : Perspectives pour les sciences de l'éducation* (pp. 135 -164) : de Boeck.
- Beaudoin-Ryan, L., & Goldin-Meadow, S. (2014). Teaching moral reasoning through gesture. *Developmental science*, 17(6), 984 -1000. <https://doi.org/10.1111/desc.12180>
- Berney, S., & Bétrancourt, M. (2016). Does animation enhance learning? A meta-analysis. *Computers & Education*, 101, 150 -167. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.06.005>
- Berthoz A. (2009) The Human Brain “Projects” upon the World, Simplifying Principles and Rules for Perception. In: Berthoz A., Christen Y. (eds) *Neurobiology of “Umwelt”. Research and Perspectives in Neurosciences* (pp. 17-27). Springer, Berlin, Heidelberg
- Berthoz, A. (2009). *La simplicité*. Paris : Editions Odile Jacob.
- Betrancourt, M. (2012). Flash informatique D. Vol.Spécial été,2012,p. 49-51. Repéré à : <https://issuu.com/flashinfo/docs/flashinformatique.epfl.ch>
- Betrancourt, M., Bauer-Morrison, J., & Tversky, B. (2001). Les animations sont-elles vraiment plus efficaces ? *Revue d'intelligence artificielle*, 14, 149 -166
- Broaders, S. C., Cook, S. W., Mitchell, Z., & Goldin-Meadow, S. (2007). Making children gesture brings out implicit knowledge and leads to learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(4), 539 -550. <https://doi.org/10.1037/0096-1005.136.4.539>
- Brucker, B., Ehlis, A.-C., Häußinger, F. B., Fallgatter, A. J., & Gerjets, P. (2015). Watching corresponding gestures facilitates learning with animations by activating human mirror-neurons : An fNIRS study. *Learning and Instruction*, 36, 27 -37. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.11.003>

Caissie, A. F., Vigneau, F., & Bors, D. A. (2009). What does the Mental Rotation Test measure? An analysis of item difficulty and item characteristics. *Open Psychology Journal*, 2(1), 94–102. <http://dx.doi.org/10.2174/1874350100902010094>

Camos, V., & Barrouillet, P. (2014). Le développement de la mémoire de travail : Perspectives dans le cadre du modèle de partage temporel des ressources. *Psychologie Française*, 59, 21–39. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2012.12.001>

Caramazza, A., McCloskey, M., & Green, B. (1981). Naive beliefs in “sophisticated” subjects: Misconceptions about trajectories of objects. *Cognition*, 9(2), 117–123. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(81\)90007-X](https://doi.org/10.1016/0010-0277(81)90007-X)

Castro-Alonso, J., Ayres, P., & Paas, F. (2015) The potential of embodied cognition to improve STEAM instructional dynamic visualizations. In X. Ge, D. Ifenthaler, J. Spector (Eds.) *Emerging Technologies for STEAM Education. Educational Communications and Technology: Issues and Innovations* (pp. 113-136). Cham : Springer.

Chanquoy, L., Tricot, A., & Sweller, J. (2007). *La charge cognitive : Théorie et applications*. Paris, France : A. Colin.

Chemero, A. (2011). *Radical Embodied Cognitive Science*. Cambridge, MA, USA : The MIT Press.

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. *Frontiers in Psychology*, 8, 1689. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01689>

Chu, M., & Kita, S. (2011). The nature of gestures’ beneficial role in spatial problem solving. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140, 102–116. <https://doi.org/10.1037/a0021790>

Clark, A. (2010). *Supersizing the Mind : Embodiment, Action, and Cognitive Extension* (1 edition). New York : Oxford University Press.

Cockburn, A., Ahlström, D., & Gutwin, C. (2012). Understanding performance in touch selections: Tap, drag and radial pointing drag with finger, stylus and mouse. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70(3), 218–233. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2011.11.002>

Cohé, A., & Hachet, M. (2012). Beyond the mouse : Understanding user gestures for manipulating 3D objects from touchscreen inputs. *Computers & Graphics*, 36(8), 1119–1130. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2012.09.004>

- Cook, S. W., Mitchell, Z., & Goldin-Meadow, S. (2008). Gesturing makes learning last. *Cognition*, 106(2), 1047 -1058. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.03.005>
- Corbetta, D. (2000). Le corps et la pensée chez le bébé : Apport des systèmes dynamiques. *Enfance*, 53(3), 259 -273. <https://doi.org/10.3406/enf.2000.53.3.259>
- Cowan, N. (1988). Evolving conceptions of memory storage, selective attention, and their mutual constraints within the human information-processing system. *Psychological Bulletin*, 104(2), 163 -191. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.104.2.163>
- Cowan, N. (2005). *Working Memory Capacity* (1 edition). New York : Psychology Press.
- de Koning, B. B., & Tabbers, H. K. (2013). Gestures in Instructional Animations : A Helping Hand to Understanding Non-human Movements? *Applied Cognitive Psychology*, 27(5), 683 -689. <https://doi.org/10.1002/acp.2937>
- De Ribaupierre, A. (2016). Mémoire de travail, développement cognitif et performances scolaires. In E. & D. Tardif P.A. (Ed.), *Neurosciences et cognition : Perspectives pour les sciences de l'éducation* (pp. 165-188). Louvain-la-Neuve : de Boeck.
- Dehaene, S. (2018). *Apprendre ! : Les talents du cerveau, le défi des machines*. Paris : Odile Jacob.
- Derboven, J., De Roeck, D., & Verstraete, M. (2012). Semiotic analysis of multi-touch interface design : The mutable case study. *International Journal of Human-Computer Studies*, 70(10), 714–728. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2012.05.005>
- Dhir, A., Gahwaji, N., & Nyman, G. (2013). The Role of the iPad in the Hands of the Learner. *Journal of Universal Computer Science*, 19, 706 -727. <http://dx.doi.org/10.3217/jucs-019-05-0706>
- Ekstrom, R. B., Dermen, D., & Harman, H. H. (1976). *Manual for kit of factor-referenced cognitive tests*. Princeton N.J: Educational Testing Service.
- Engle, R. W. (2002). Working Memory Capacity as Executive Attention. *Current Directions in Psychological Science*, 11(1), 19 -22. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00111>
- Eustache, F., & Guillery-Girard, B. (2016). *La neuroéducation : La mémoire au coeur des apprentissages*. Paris : Odile Jacob.
- Findlater, L., Froehlich, J. E., Fattal, K., Wobbrock, J. O., & Dastyar, T. (2013). Age-related Differences in Performance with Touchscreens Compared to Traditional Mouse Input. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 343–346). New York, NY, USA : ACM. <https://doi.org/10.1145/2470654.2470703>

Fiorella, L., & Mayer, R. E. (2016). Effects of observing the instructor draw diagrams on learning from multimedia messages. *Journal of Educational Psychology*, 108(4), 528 -546. <https://doi.org/10.1037/edu0000065>

Fugate, J. M. B., Macrine, S. L., & Cipriano, C. (2019). The role of embodied cognition for transforming learning. *International Journal of School & Educational Psychology*, 7(4), 274 -288. <https://doi.org/10.1080/21>

Gardony, A. L., Taylor, H. A., & Brunye, T. T. (2014). What does physical rotation reveal about mental rotation? *Psychological Science*, 25(2), 605 -612.

Gibson, J. J. (1979). *The Ecological Approach to Visual Perception*. Boston, MA, USA : Houghton, Mifflin and Company.

Gicquel, P.-Y. (2010). Vers une modélisation des situations d'apprentissage ubiquitaire. In *Actes des troisièmes Rencontres Jeunes Chercheurs en ELAH* (pp. 93 -98). Repéré à <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00506967>

Gog, T. van, Paas, F., Marcus, N., Ayres, P., & Sweller, J. (2009). The mirror neuron system and observational learning: Implications for the effectiveness of dynamic visualizations. *Educational Psychology Review*, 21(1), 21 -30. <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9094-3>

Goldin-Meadow, S. (2003). *Hearing gesture: How our hands help us think*. Cambridge, MA, US : Belknap Press of Harvard University Press.

Goldin-Meadow, S. (2014). How gesture works to change our minds. *Trends in Neuroscience and Education*, 3(1), 4 -6. <https://doi.org/10.1016>

Goldin-Meadow, S., & Beilock, S. (2010). Action's influence on thought : The case of gesture. *Perspectives on psychological science: A journal of the Association for Psychological Science*, 5(6), 664 -674. <https://doi.org/10.1177/1745691610388764>

Goldin-Meadow, S., Levine, S. C., Zinchenko, E., Yip, T. K., Hemani, N., & Factor, L. (2012). Doing gesture promotes learning a mental transformation task better than seeing gesture. *Developmental science*, 15(6), 876 -884. <https://7687.2012.01185.x>

Gunderson, E. A., Spaepen, E., Gibson, D., Goldin-Meadow, S., & Levine, S. C. (2015). Gesture as a window onto children's number knowledge. *Cognition*, 144, 14 -28. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.008>

Haßler, B., Major, L., & Hennessy, S. (2016). Tablet use in schools : A critical review of the evidence for learning outcomes. *Journal of Computer Assisted Learning*, 32(2), 139 -156. <https://doi.org/10.1111/jcal.12123>

Hegarty, M. (2010). Components of spatial intelligence. In B. H. Ross (Ed.), *The psychology of learning and motivation: Vol. 52. The psychology of learning and motivation: Advances in research and theory* (p. 265–297). Elsevier Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(10\)52007-3](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(10)52007-3)

Helsen, W. F., Elliott, D., Starkes, J. L., & Ricker, K. L. (1998). Temporal and spatial coupling of point of gaze and hand movements in aiming. *Journal of Motor Behavior*, 30(3), 249–259. <https://doi.org/10.1080/00222899809601340>

Hinrichs, U., & Carpendale, S. (2011). Gestures in the wild: Studying multi-touch gesture sequences on interactive tabletop exhibits. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 3023–3032). New York, NY, USA: ACM. <https://doi.org/10.1145/1978942.1979391>

Höffler, T. N. (2010). Spatial ability: Its influence on learning with visualizations—a meta-analytic review. *Educational Psychology Review*, 22(3), 245–269. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9126-7>

Höffler, T. N., & Leutner, D. (2011). The role of spatial ability in learning from instructional animations – Evidence for an ability-as-compensator hypothesis. *Computers in Human Behavior*, 27(1), 209–216. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2010.07.042>

Hoyek, N., Collet, C., & Guillot, A. (2010). Représentation mentale et processus moteur: Le cas de la rotation mentale. *Science & Motricité*, (71), 29–39. <https://doi.org/10.1051/sm/2009013>

Huang, C.-M., & Mutlu, B. (2013). Modeling and Evaluating Narrative Gestures for Humanlike Robots. In *Proceedings of Robotics: Science and Systems* (pp. 57-64). Berlin, Germany. <https://doi.org/10.15607/RSS.2013.IX.026>

Jimoyiannis, A., & Komis, V. (2001). Computer simulations in physics teaching and learning: A case study on students' understanding of trajectory motion. *Computers & Education*, 36(2), 183–205. [https://doi.org/10.1016/S0360-1375\(00\)00101-2](https://doi.org/10.1016/S0360-1375(00)00101-2)

Johnson-Glenberg, M. C., & Megowan-Romanowicz, C. (2017). Embodied science and mixed reality: How gesture and motion capture affect physics education. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 2(1), 24. <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0060-9>

Johnson-Glenberg, M. C., Megowan-Romanowicz, C., Birchfield, D. A., & Savio-Ramos, C. (2016). Effects of embodied learning and digital platform on the retention of physics content: Centripetal force. *Frontiers in Psychology*, 7, 1-22. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01819>

Jolly, C., & Gentaz, E. (2013). Évaluation des effets d'entraînements avec tablette tactile destinés à favoriser l'écriture de lettres cursives chez des enfants de Cours Préparatoire. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation*, 20, 1-13. <https://doi.org/10.3406/stice.2013.1080>

Jouen, F., & Molina, M. (2007). Chapitre 5. La théorie de la dynamique des systèmes. In F. Jouen & M. Molina (Eds). *Naissance et connaissance* (pp. 81 -90). Marenne

Kawamichi, H., Kikuchi, Y., Noriuchi, M., Senoo, A., & Ueno, S. (2007). Distinct neural correlates underlying two- and three-dimensional mental rotations using three-dimensional objects. *Brain Research*, 1144, 117 -126. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.01.082>

Koning, B. B. de, & Jarodzka, H. (2017). Attention guidance strategies for supporting learning from dynamic visualizations. In Lowe, Richard and Ploetzner, Rol (Eds.) *Learning from Dynamic Visualization* (pp. 255 -278) : Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56204-9_11

Koning, B. B. de, & Tabbers, H. K. (2011). Facilitating Understanding of Movements in Dynamic Visualizations: An Embodied Perspective. *Educational Psychology Review*, 23(4), 501 -521. <https://doi.org/10.1007/s10648-011-9173-8>

Koning, B. B. de, Tabbers, H. K., Rikers, R. M. J. P., & Paas, F. (2009). Towards a framework for attention cueing in instructional animations: Guidelines for research and design. *Educational Psychology Review*, 21(2), 113 -140. <https://doi.org/10.1007/s10648-009-9098-7>

Kozhevnikov, M., & Hegarty, M. (2001). A dissociation between object manipulation spatial ability and spatial orientation ability. *Memory & Cognition*, 29(5), 745 -756. <https://doi.org/10.3758/BF03200477>

Kozhevnikov, M., & Thornton, R. (2006). Real-time data display, spatial visualization ability, and learning force and motion concepts. *Journal of Science Education and Technology*, 15(1), 111-132. <https://doi.org/10.1007/s10956-006-0361-0>

Lachaux, J.-P. (2015). *Cerveau funambule*. Paris : Éditions Odile Jacob.

Lichtenberger, A., Vaterlaus, A., & Wagner, C. (2014). Analysis of student concept knowledge in kinematics. In Proceedings of the *ESERA the 2013th E-Book Conference: Teaching and Coherence in Learning Science Education Research for Evidence Based, Part* (Vol. 11, pp. 38-50).

Liebling, D. J., & Dumais, S. T. (2014). Gaze and mouse coordination in everyday work. In proceedings of *UbiComp '14 Adjunct: Proceedings of the 2014 ACM International*

- Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing: Adjunct Publication* (pp. 1141 -1150). ACM Press. <https://doi.org/10.1141>
- Ling, G. (2016). Does it matter whether one takes a test on an iPad or a desktop computer? *International Journal of Testing*, 16(4), 352 -377. <https://doi.org/10.1080/15305058.2016.1160097>
- Lowe, R., & Boucheix, J.-M. (2008). Learning from animated diagrams : How are mental models built? In Stapleton, Gem & Howse, John & Lee, John (Eds.) *Diagrammatic Representation and Inference* (pp. 266 -285). Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-87730-1_25
- Lowe, R. K. (1999). Extracting information from an animation during complex visual learning. *European Journal of Psychology of Education*, 14(2), 225 -244. <https://doi.org/10.1007/BF03172967>
- Maquestiaux, F., Lemaire, P. : P., & Isingrini, P. : M. (2013). *Psychologie de l'attention* (Edition 2013). Bruxelles : De Boeck.
- Martin-Gutierrez, J., & Contero, M. (2012). Predictive models on improvement of spatial abilities in controlled training. In *Frontiers in Education Conference (FIE), 2012* (pp. 1 -6). <https://doi.org/10.1109/FIE.2012.6462349>
- Mason, L., Tornatora, M. C., & Pluchino, P. (2013). Do fourth graders integrate text and picture in processing and learning from an illustrated science text? Evidence from eye-movement patterns. *Computers & Education*, 60(1), 95 -109. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.07.011>
- Masson, M. E. J., Bub, D. N., & Lalonde, C. E. (2011). Video-game training and naïve reasoning about object motion. *Applied Cognitive Psychology*, 25(1), 166 -177. <https://doi.org/10.1002/acp.1658>
- Mayer, R. E. (2005). Cognitive Theory of Multimedia Learning. In R. Mayer (Ed.) *The Cambridge handbook of multimedia learning* (pp. 31 -48). New York : Cambridge University Press.
- McBeath, M. K., Shaffer, D. M., & Kaiser, M. K. (1995). How baseball outfielders determine where to run to catch fly balls. *Science*, 268, 569 -573. <https://doi.org/10.1126/science.7725104>
- McCabe, D. P., Roediger, H. L., McDaniel, M. A., Balota, D. A., & Hambrick, D. Z. (2010). The relationship between working memory capacity and executive functioning : Evidence for a common executive attention construct. *Neuropsychology*, 24(2), 222 -243. <https://doi.org/10.1037/a0017619>

McDermott, L. C., Rosenquist, M. L., & Zee, E. H. van. (1987). Student difficulties in connecting graphs and physics : Examples from kinematics. *American Journal of Physics*, 55(6), 503 -513. <https://doi.org/10.1119/1.15104>

McNeill, D. (1992). *Hand and mind : What gestures reveal about thought*. Chicago, IL, US : University of Chicago Press.

Montrieux, H., Courtois, C., Raes, A., Schellens, T., & De Marez, L. (2014). Mobile learning in secondary education : Teachers' and students' perceptions and acceptance of tablet computers. *International journal of mobile and blended learning*, 6(2), 26 -40. <http://dx.doi.org/10.4018/ijmbl.2014040103>

Montrieux, H., Raes, A., & Schellens, T. (2017). The best app is the teacher' introducing classroom scripts in technology-enhanced education. *Journal of computer assisted learning*, 33(3), 267 -281. <http://dx.doi.org/10.1111/jcal.1>

Moore, J. C., Baker, J. C., Franzel, L., McMahon, D., & Songer, D. (2010). Graphical method for determining projectile trajectory. *ResearchGate*, 48(9), 612 -613. <https://doi.org/10.1119/1.3517033>

Mulet, J., van de Leemput, C., & Amadiou, F. (2019). A critical literature review of perceptions of tablets for learning in primary and secondary schools. *Educational Psychology Review*, 219, 31-40. <https://doi.org/10.1007/s10648-019-09478-0>

Nakaishi, H., & Yamada, Y. (1999). Abnormal tear dynamics and symptoms of eyestrain in operators of visual display terminals. *Occupational and Environmental Medicine*, 56(1), 6 -9. <https://doi.org/10.1136/oem.56.1.6>

Newcombe, N. S., & Shipley, T. F. (2015). Thinking about spatial thinking : New typology, new assessments. In J. S. Gero (Éd.), *Studying Visual and Spatial Reasoning for Design Creativity* (pp. 179 -192). Dordrecht : Springer Netherlands.

Newcombe, N. S., & Stieff, M. (2012). Six myths about spatial thinking. *International Journal of Science Education*, 34(6), 955 -971. <https://doi.org/10.1080/09500693.2011.588728>

Paas, F., & Sweller, J. (2011). An evolutionary upgrade of cognitive load theory : Using the human motor system and collaboration to support the learning of complex cognitive tasks. *Educational Psychology Review*, 24(1), 27 -45. <https://doi.org/10.1080/01690960903424248>

Parrill, F. (2010). Viewpoint in speech-gesture integration : Linguistic structure, discourse structure, and event structure. *Language and Cognitive Processes*, 25, 650 -668. <https://doi.org/10.1080/01690960903424248>

- Peters, M., & Battista, C. (2008). Applications of mental rotation figures of the Shepard and Metzler type and description of a mental rotation stimulus library. *Brain and Cognition*, 66(3), 260-264. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2008.05.018>
- Pfeuffer, K., Alexander, J., Ki Chong, M., & Gellersen, H. (2014). Gaze-touch : Combining gaze with multi-touch for interaction on the same surface. *UIST 2014—Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology* (pp. 509-518). <https://doi.org/10.1145/2642918.2647397>
- Pouw, W. T. J. L., de Nooijer, J. A., van Gog, T., Zwaan, R. A., & Paas, F. (2014). Toward a more embedded/extended perspective on the cognitive function of gestures. *Frontiers in Psychology*, 5, 359. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00359>
- Roy, A., Gall, D. L., Roulin, J.-L., & Fournet, N. (2012). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Approche épistémologique et sémiologie clinique. *Revue de neuropsychologie*, 4(4), 287-297. <https://doi.org/10.3917/rne.044.0287>
- Sanchez, C. A. (2012). Enhancing visuospatial performance through video game training to increase learning in visuospatial science domains. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(1), 58-65. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0177-7>
- Segal, A., Tversky, B., & Black, J. (2014). Conceptually congruent actions can promote thought. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 3(3), 124-130. <https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2014.06.004>
- Sepp, S., Howard, S. J., Tindall-Ford, S., Agostinho, S., & Paas, F. (2019). Cognitive load theory and human movement: Towards an integrated model of working memory. *Educational Psychology Review*, 31(2), 293-319. <https://doi.org/10.1007/s11014-019-0946-9>
- Shaffer, D. M., Krauchunas, S. M., Eddy, M., & McBeath, M. K. (2004). How dogs navigate to catch frisbees. *Psychological Science*, 15(7), 437-441. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00698.x>
- Shapiro, L., & Stolz, S. A. (2019). Embodied cognition and its significance for education. *Theory and Research in Education*, 17(1), 19-39. <https://doi.org/10.1177/1477878518822149>
- Shepard, R. N., & Metzler, J. (1971). Mental rotation of three-dimensional objects. *Science*, 171, 701-703. <https://doi.org/10.1126/science.171.3972.701>
- Sheu, F.-R., & Chen, N.-S. (2014). Taking a signal : A review of gesture-based computing research in education. *Computers & Education*, 78, 268-277. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.06.008>

Smith, B., Ho, J., Ark, W., & Zhai, S. (2000). Hand eye coordination patterns in target selection. In *Proceedings of the Eye Tracking Research and Applications Symposium* (pp. 117-222). New York, NY, USA : Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/355017.355041>

Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving : Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257 -285. <https://doi.org/10.1209>

Tellier, M. (2010). Faire un geste pour l'apprentissage : Le geste pédagogique dans l'enseignement précoce. In C. Colette (Éd.), *L'enseignement des langues vivantes étrangères à l'école* (pp. 31 -54) : L'Harmattan.

Thelen, E., Schöner, G., Scheier, C., & Smith, L. B. (2001). The dynamics of embodiment : A field theory of infant perseverative reaching. *The Behavioral and Brain Sciences*, 24(1), 1 -34.

Thelen, Esther, & Smith, L. B. (1994). *A dynamic systems approach to the development of cognition and action* (Vol. xxiii). Cambridge, MA, US : The MIT Press.

Tversky, B., Morrison, J. B., & Betrancourt, M. (2002). Animation : Can it facilitate? *International Journal of Human-Computer Studies*, 57(4), 247 -262. <https://doi.org/10.1006/ijhc.2002.1017>

Uttal, D. H., Meadow, N. G., Tipton, E., Hand, L. L., Alden, A. R., Warren, C., & Newcombe, N. S. (2013). The malleability of spatial skills : A meta-analysis of training studies. *Psychological Bulletin*, 139(2), 352 -402. <https://doi.org/10.1037/a0028343>

Vallett, D. B. (2013). Factors influencing learner conceptions of force : Exploring the interaction among visuospatial ability, motivation, and conceptions of newtonian mechanics in university undergraduates from an evolutionary perspective. (Thèse de doctorat, George Mason University). Repéré à : <http://hdl.handle.net/1920/8333>

van Gog, T., Paas, F., Marcus, N., Ayres, P., & Sweller, J. (2009). The mirror neuron system and observational learning : Implications for the effectiveness of dynamic visualizations. *Educational Psychology Review*, 21(1), 21 -30. <https://doi.org/10.1007/s10648-008-9094-3>

Vandenberg, S. G., & Kuse, A. R. (1978). Mental rotations, a group test of three-dimensional spatial visualization. *Perceptual and Motor Skills*, 47(2), 599 -604. <https://doi.org/10.2466/pms.1978.47.2.599>

Varela, F. (1998). Le cerveau n'est pas un ordinateur. *La recherche*, 308, 109–112.

Varela, F. J., Thompson, E., & Rosch, E. (1991). *The embodied mind : Cognitive science and human experience*. Cambridge, MA, US : The MIT Press.

- Varela, F.-J. (1997). *Invitation aux sciences cognitives. Edition 1996*. Paris : Seuil.
- Victorri, B. (2008). *Chapitre 7. Le connexionnisme*. In F. Eustache, B. Lechevalier, & F. Viader (Eds.) *Traité de neuropsychologie clinique* (pp. 53-64). Paris: De Boeck Supérieur.
- Villamor, C., Willis, D., & Wroblewski, L. (2010). Touch gesture reference guide. Repéré à : <https://static.lukew.com/TouchGestureGuide.pdf>
- Wai, J., Lubinski, D., & Benbow, C. P. (2009). Spatial ability for STEM domains : Aligning over 50 years of cumulative psychological knowledge solidifies its importance. *Journal of Educational Psychology*, *101*(4), 817 -835. <https://doi.org>
- Walkington, C., Boncoddò, R., Williams, C., Nathan, M., Alibali, M., Simon, E., & Pier, E. (2014). Being mathematical relations : Dynamic gestures support mathematical reasoning. In J. L. Polman, E. A. Kyza, D. K. O'Neill, I. Tabak, W. R. Penuel, A. S. Jurow, K. O'Connor, T. Lee, & L. D'Amico (Eds.). *Learning and Becoming in Practice: The International Conference of the Learning Sciences (ICLS)* (pp. 479-486). Colorado, CO: International Society of the Learning Sciences. <https://doi.org/10.13140/2.1.4080.0005>
- Wexler, M., Kosslyn, S. M., & Berthoz, A. (1998). Motor processes in mental rotation. *Cognition*, *68*(1), 77 -104. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(98\)00032-8](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(98)00032-8)
- Wilson, A. D., & Golonka, S. (2013). Embodied cognition is not what you think it is. *Frontiers in Psychology*, *4*, 1-13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00058>
- Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, *9*(4), 625 -636. <https://doi.org/10.3758/BF03196322>
- Wobbrock, J. O., Morris, M. R., & Wilson, A. D. (2009). User-defined Gestures for Surface Computing. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1083-1092). New York, NY, USA : ACM. <https://doi.org/10.1145/1518701.1518866>
- Wood, E., Willoughby, T., Rushing, A., Bechtel, L., & Gilbert, J. (2005). Use of computer input devices by older adults. *Journal of Applied Gerontology*, *24*(5), 419 -438. <https://doi.org/10.1177/0733464805278378>
- Zacks, J. M. (2008). Neuroimaging studies of mental rotation : A Meta-analysis and Review. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *20*(1), 1 -19. <https://doi.org/10.1162/jocn.2008.20013>

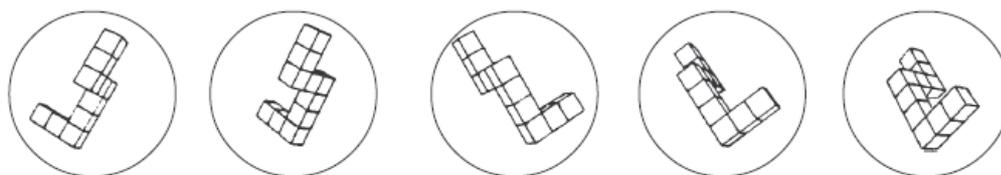
Annexes

Annexe 1 : Documents relatifs à l'expérience 1

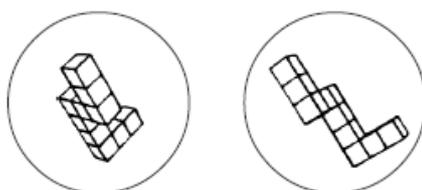
Test de rotation mentale

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

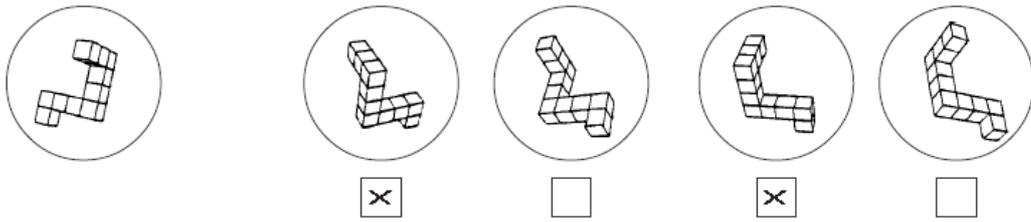
“Ceci est un test destiné à mesurer votre aptitude à reconnaître le dessin d'un objet donné parmi un ensemble d'objets différents. La seule différence entre l'objet original et l'objet à trouver consiste en une modification de l'angle sous lequel il est vu. Une illustration de ce procédé est donnée ci-dessous,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



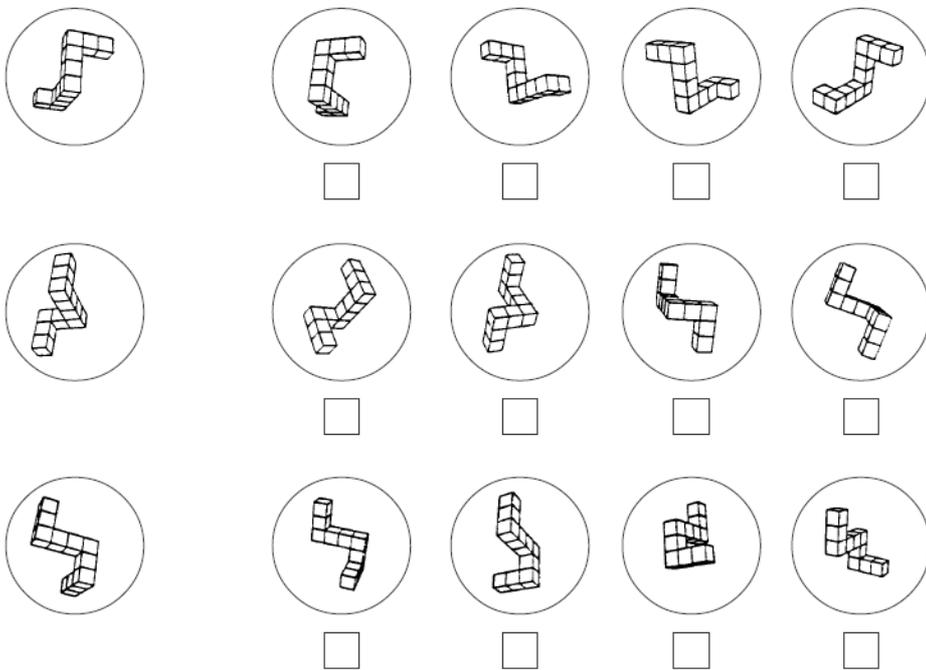
“Ci-dessous, vous voyez deux dessins d'un nouvel objet. Ils ne peuvent pas être appariés avec les cinq dessins ci-dessus. Notez que vous ne pouvez pas retourner les objets. Voyez vous-mêmes qu'ils sont différents.”



“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.”



Complétez les exemples suivants vous-même. Quels sont les deux dessins, parmi les quatre situés à droite, qui montrent la même structure que celle de gauche ? Il y a toujours deux et seulement deux réponses correctes pour chaque problème. Mettez un x sous les deux dessins corrects.” (3 exemples à compléter, puis à corriger immédiatement).



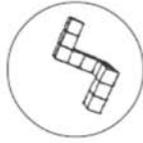
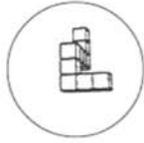
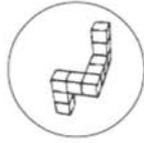
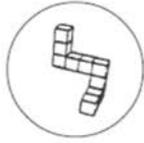
Réponses :1 - Premier et second dessins corrects 2 - Premier et troisième dessins corrects 3 - Deuxième et troisième dessins corrects

Ce test comprend deux parties. Vous avez 3 minutes pour chacune. Chaque partie a deux pages. Quand vous avez fini la partie 1, arrêtez-vous. Ne commencez pas la partie 2 avant d'en être prié. Rappelez-vous qu'il y a toujours deux et seulement deux réponses correctes par item. Travaillez aussi rapidement que vous pouvez sans négliger l'exactitude. Votre score à ce test dépend à la fois des réponses correctes et incorrectes. Cependant, vous n'avez pas intérêt à deviner sans avoir une idée sur l'exactitude de votre choix.

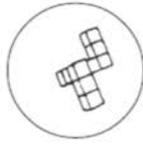
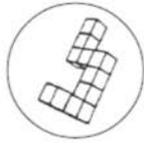
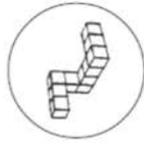
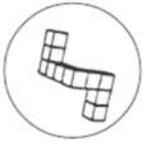




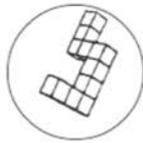
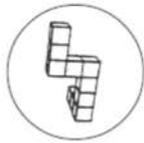
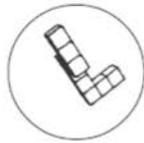
11



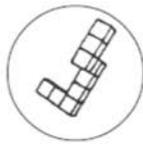
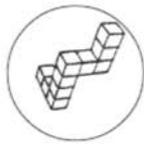
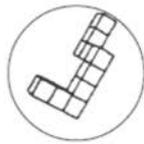
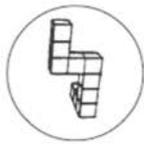
12



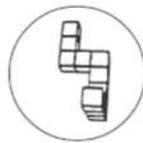
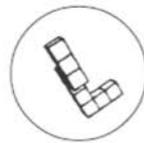
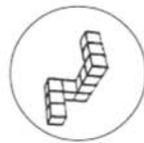
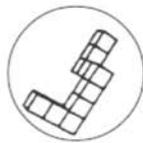
13



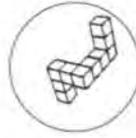
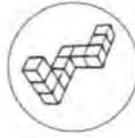
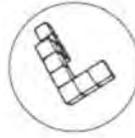
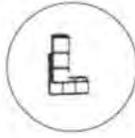
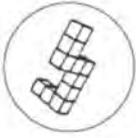
14



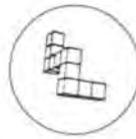
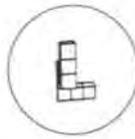
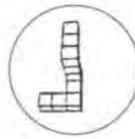
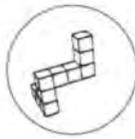
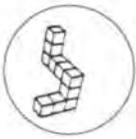
15



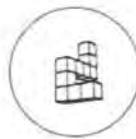
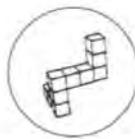
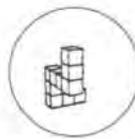
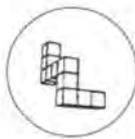
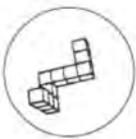
16



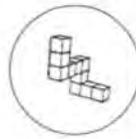
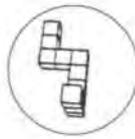
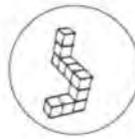
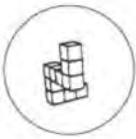
17



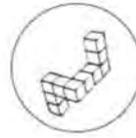
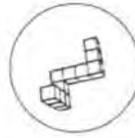
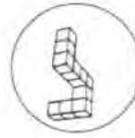
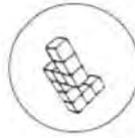
18



19



20



Questionnaire sur la pratique auto-rapportée aux jeux vidéos

Je joue à des jeux vidéos 2D (jeux de cartes, Candy-Crush..):

Jamais A l'occasion Quelques fois par semaine Une fois par jour Plusieurs fois par jour

Je joue à des jeux vidéos en 3D (courses de voitures, Jeux de Tir à la première personne...):

Jamais A l'occasion Quelques fois par semaine Une fois par jour Plusieurs fois par jour

Questionnaire sur la stratégie mise en œuvre dans la tâche

Vous venez de réaliser une activité consistant à déterminer si deux objets étaient identiques mais dans une position différente ou différents de par leur structure. Pour réaliser ces exercices merci de préciser pour les stratégies suivantes dans quelles proportions vous les avez utilisées :

	Pas du tout	Rarement	Quelques fois	Souvent	Tout le temps
J'ai fait tourner la figure à l'écran.	<input type="radio"/>				
J'ai fait tourner la figure dans ma tête.	<input type="radio"/>				
J'ai compté les cubes.	<input type="radio"/>				
J'ai comparé les couleurs des cubes.	<input type="radio"/>				
J'ai utilisé une autre stratégie.	<input type="radio"/>				

Questionnaire sur l'aide ressenti en rapport avec la rotation de l'objet.

Le fait de tourner l'un des deux objets à l'écran vous a aidé à déterminer plus facilement si les deux objets étaient identiques :

- Pas du tout d'accord.
- Pas d'accord.
- Plutôt pas d'accord.
- Plutôt d'accord.
- D'accord.
- Tout à fait d'accord.

Le fait de tourner l'un des deux objets à l'écran vous a aidé à répondre plus rapidement aux exercices :

- Pas du tout d'accord.
- Pas d'accord.
- Plutôt pas d'accord.
- Plutôt d'accord.
- D'accord.
- Tout à fait d'accord.

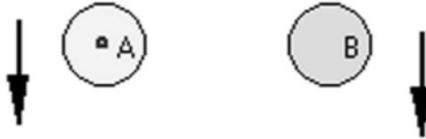
Annexe 2 : Documents relatifs à l'expérience 2.

Questions du pré-test et post test (10 premières)

Vous allez maintenant répondre à 15 questions portant sur des notions de mécanique. Dans les questions qui vont suivre cocher la bonne réponse. Pour certaines questions vous pouvez cocher la case je ne sais pas si vous n'avez aucune idée de la bonne réponse.

Q1 :

Deux balles A et B sont lâchées d'une même altitude h . La balle B possède une masse double de la balle A. Les frottements de l'air sont négligeables.



- La balle A va toucher le sol en premier.
- La balle B va toucher le sol en premier
- Les balles A et B vont toucher le sol en même temps.
- Je ne sais pas.

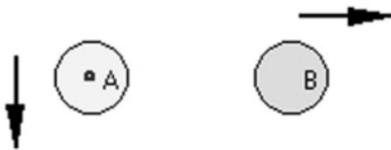
Q2 :

Quand elles touchent le sol :

- La vitesse de la balle A sera deux fois plus faible que celle de la balle B.
- Les vitesses des balles A et B seront identiques.
- La vitesse de la balle A sera quatre fois plus faible que celle de la balle B.
- Je ne sais pas.

Q3 :

La balle A et la balle B ont cette fois une masse identique. La balle A est lâchée d'une hauteur h et la balle B est lancée horizontalement simultanément de la même hauteur. Les frottements de l'air sont négligeables.



- La balle A va toucher le sol en premier.
- La balle B va toucher le sol en premier.
- Les balles A et B vont toucher le sol en même temps.
- Je ne sais pas.

On considère un pendule simple constitué d'une balle de masse m attachée à l'extrémité d'un fil de masse négligeable. Ce pendule oscille sans frottement entre deux positions extrêmes représentées par les pointillés sur les schémas.

Chacun des quatre problèmes suivants présente une position particulière du pendule qui correspond au moment où le fil est coupé. Dans chaque cas préciser l'allure de la trajectoire ultérieure de la balle après que le fil ait été coupé.

Q4 : Problème A : Le pendule est en position extrême lorsque l'on coupe le fil.



Q5 : Problème B



Q6 : Problème C



Q7 : Problème D

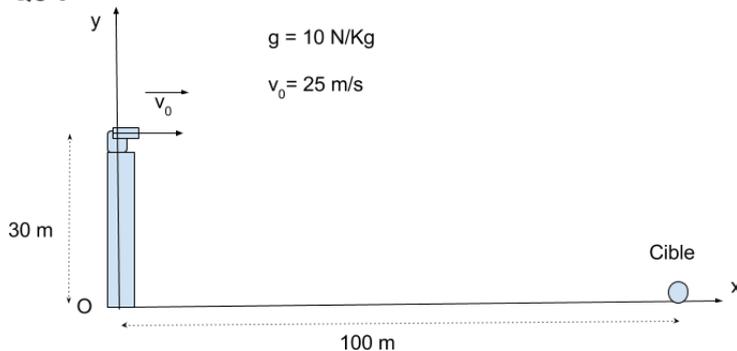


Q8 :

Quand un corps tombe en chute libre dans un champ de pesanteur uniforme :

- son accélération est indépendante de sa vitesse initiale.
- sa vitesse augmente proportionnellement au carré de la durée de chute t .
- sa variation d'énergie potentielle sur une distance de chute donnée est indépendante de sa masse.
- Je ne sais pas.

Q9 :



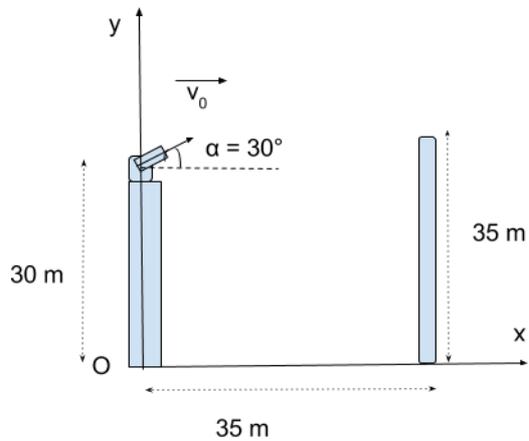
Un boulet est lancé horizontalement par un canon placé à 30 mètres de haut avec une vitesse horizontale de valeur : 25 m/s. Les frottements de l'air sont négligeables. La cible est située à 100 mètres du canon.

- Le boulet touchera la cible.
- Le boulet touchera le sol avant la cible.
- Le boulet touchera le sol après la cible.
- Je ne sais pas.

Q10 :

$$g = 10 \text{ N/Kg}$$

$$v_0 = 20 \text{ m/s}$$



Un boulet est lancé par un canon placé à 30 mètres de haut avec une vitesse de 20 m/s faisant un angle de 30° avec l'horizontale. Les frottements de l'air sont négligeables.

Un mur de 35 mètres de haut se dresse à 35 m du canon. On rappelle que : $\cos(30^\circ)=0,87$ et $\sin(30^\circ)=0,5$

- Le boulet passera très largement au-dessus du mur.
- Le boulet frôlera le mur mais passera au-dessus.
- Le boulet percutera le mur.
- Je ne sais pas.

Q11 :

La relation qui lie le champ de pesanteur \vec{g} à la verticale d'un objet de masse m et le poids de l'objet est :

• $\vec{g} = \vec{P} \times m$

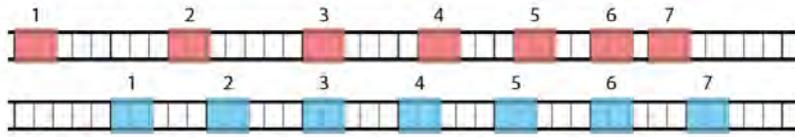
• $\vec{g} = \frac{\vec{P}}{m}$

• $\vec{g} = \frac{m}{\vec{P}}$

- Je ne sais pas.

Q12 :

Deux locomotives se déplacent dans la même direction sur un rail horizontal. Les positions respectives des locomotives à chaque seconde sont représentées par des rectangles numérotés sur la figure ci-dessous :

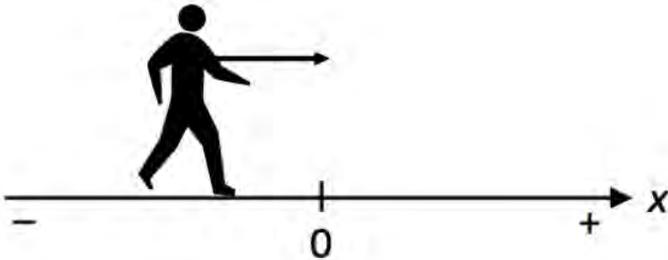


Est-ce que les deux locomotives ont à un moment la même vitesse ?

- Non
- Oui à l'instant 3.
- Oui à l'instant 6.
- Oui aux instants 3 et 6.
- Oui à un instant entre les positions 4 et 5.

Q13 :

Joe marche à vitesse constante dans la direction de l'axe orienté x . Sa marche est représentée sur le schéma ci-dessous ainsi que son vecteur vitesse.

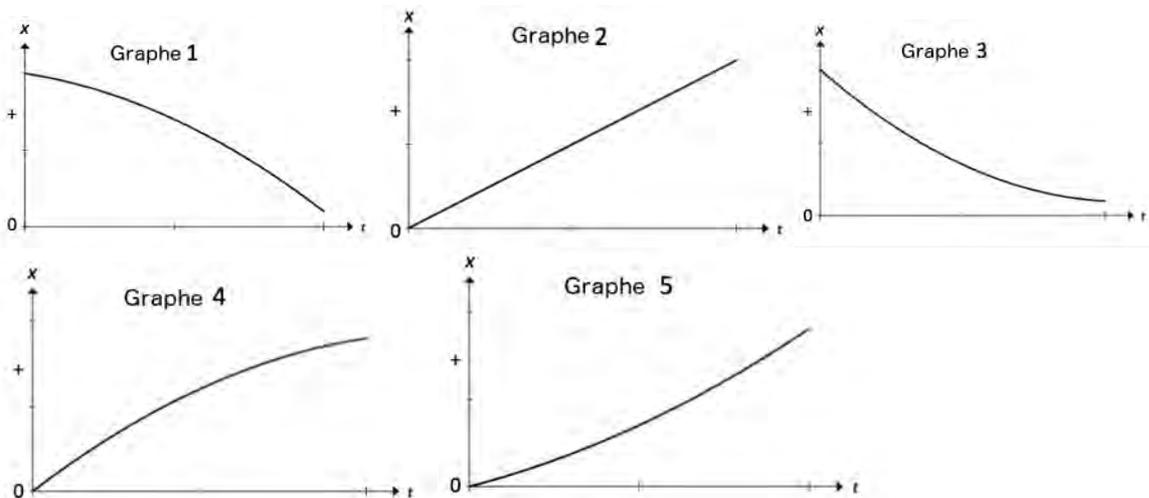


Parmi les affirmations suivantes, laquelle décrit le mieux le mouvement de Joe ?

- La composante du vecteur vitesse est nulle.
- La composante du vecteur vitesse est toujours négative.
- La composante du vecteur vitesse est d'abord négative, puis positive.
- La composante du vecteur vitesse est toujours positive.
- Ce n'est pas possible de déterminer le signe de la composante du vecteur vitesse.

Q14 :

Lequel (lesquels) des graphes suivants représente(nt) le déplacement d'un objet au cours du temps dont la vitesse augmente ?

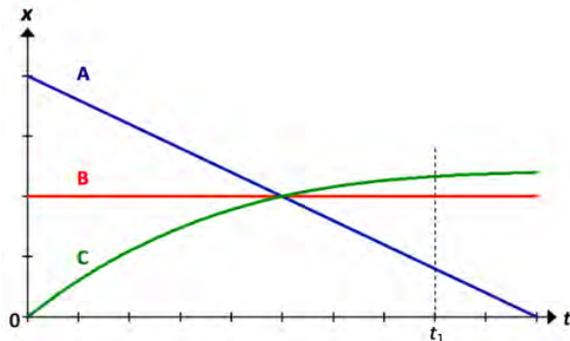


- Seulement le graphe 5.

- Seulement les graphes 1 et 5.
- Seulement les graphes 3 et 4.
- Seulement les graphes 4 et 5.
- Les graphes 2,4 et 5.

Q15 :

Les déplacements de trois voitures A, B et C au cours du temps sont représentés par les graphes suivants :



A l'instant t_1 , quelle(s) voiture(s) a (ont) la plus grande vitesse ?

- Toutes les voitures ont la même vitesse.
- La voiture A.
- La voiture B.
- La voiture C.
- Cela ne peut être déterminé à partir du graphe.

[Fiche activité du groupe expérimental](#)

Objectifs :

- Analyser et comprendre des mouvements dans le champ de pesanteur terrestre uniforme.
- Déterminer les paramètres physiques ayant une influence sur ces mouvements.

Activité 1 : Regarder la vidéo "Mouvements dans le champ de pesanteur uniforme" :

Vous devez regarder très attentivement la vidéo en une seule fois. Vous pouvez si vous le souhaitez prendre des notes, mais vous ne devez pas mettre en pause la vidéo lors de ce visionnage.

Prise en main du logiciel "Equations of Motion" :

- **Manipuler librement le simulateur pendant une à deux minutes pour bien comprendre le fonctionnement du logiciel** (réglages des paramètres avec les pastilles bleues ou directement dans le cadre scénario).

Activité 2 : Quel est le mouvement d'un boulet lancé horizontalement ?

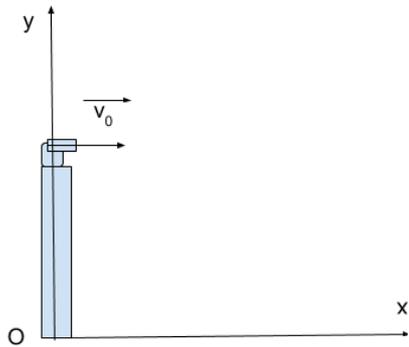
Réaliser l'ensemble des activités ci-dessous et répondre aux questions posées directement sur la feuille. Les actions à réaliser sur la tablette sont en gras.

-  On rappelle la loi de la chute libre : Un corps de masse m quelconque, lâché sans vitesse initiale d'une hauteur dans le champ de pesanteur uniforme \vec{g} , en l'absence de frottements de l'air, verra son mouvement régir, en orientant l'axe Oy vers le bas, par les équations horaires suivantes :

$$v = v_y = g.t$$

$$y = 1/2 g.t^2 \quad \text{soit pour } g = 10 \text{ m.s}^{-2} \text{ les hauteurs de chute suivantes :}$$

t (s)	0	1	2	3	4	5
y (m)	0	5	20	45	80	125



○ Lancer sur le simulateur l'activité : **Boulet lancé par un canon.**
Attention : dans le simulateur l'axe x est orienté vers la droite et l'axe y est orienté vers le haut comme dans le schéma ci-contre.

○ **Régler le simulateur.** On place le canon à une hauteur de 50 m :

Paramètres du simulateur
○ Canon Height (CY) : 50 m
○ Initial Speed (Vo) : 20 m/s
○ Trajectory Angle (α) : 0°

○ **Lancer la simulation. Observer l'allure de la trajectoire.**
A l'aide du curseur de temps, suivre lentement l'évolution du boulet. Observer notamment l'évolution des vecteurs vitesses v_x et v_y au cours du temps.

○ Comment évolue le vecteur vitesse v_x au cours du temps ?

.....

○ Selon-vous quelle est sa valeur ?

.....

○ A chaque seconde quelle est la distance parcourue par le boulet selon l'axe x ?

.....

○ Comment évolue la valeur de la vitesse v_y sur l'axe Y ?

.....

○ Selon vous, de quelle valeur, v_y , augmente-t-elle chaque seconde ?

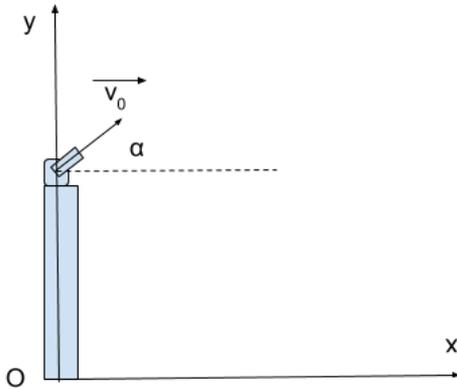
.....

○ A quelle date le boulet touche-t-il le sol ? (**Utiliser le curseur de temps pour obtenir la date précise**).

.....

○ Cette valeur était-elle prévisible ? Si oui proposer une explication.

Activité 3 : Réinvestissement : Canon incliné par rapport à l'horizontale.



○ On place le canon à une hauteur de 70 m, incliné d'un angle de 60° avec l'horizontale. La vitesse initiale est cette fois de 30 m/s.

- **Régler le simulateur** On place le canon à une hauteur de 70 m :

Paramètres du simulateur
○ Canon Height (CY) : 70 m
○ Initial Speed (Vo) : 30 m/s
○ Trajectory Angle (α) : 60°

- **Lancer la simulation. Observer l'allure de la trajectoire.**

On rappelle que dans ces conditions les coordonnées du vecteur vitesse initiale \vec{v}_0 seront données par : $v_{0x} = v_0 \times \cos(\alpha)$ et $v_{0y} = v_0 \times \sin(\alpha)$ soit ici :

$$v_{0x} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad \text{et} \quad v_{0y} = 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

- En l'absence de pesanteur $g=0$ (système isolé), quelle serait l'allure de la trajectoire du boulet ?

- Dans ce cas à chaque seconde de quelle valeur augmenterait :

- La distance parcourue selon l'axe x ?
- La distance parcourue selon l'axe y ?

Dans le cas ou maintenant $g = 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$: Utiliser le simulateur pour décomposer comme précédemment la trajectoire et suivre l'évolution des vecteurs vitesses (curseur de temps).

A quelle date le boulet sera-t-il au sommet de la trajectoire ?

Quelle sera la valeur de la vitesse v_y à cette date ?

.....

Cette date était-elle prévisible ?

Si oui, justifier :

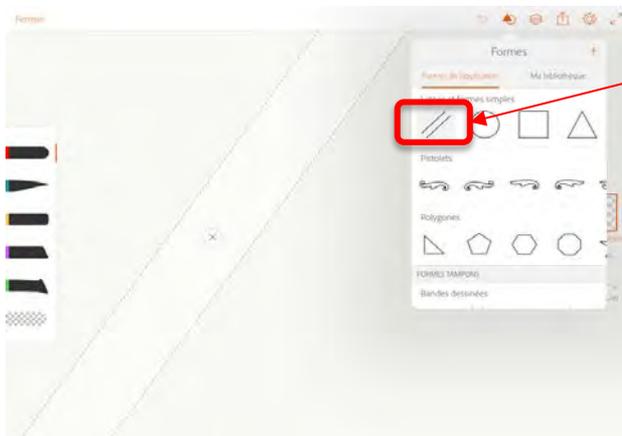
.....

.....

Quelle sera selon-vous la hauteur du boulet par rapport au sol au sommet de la trajectoire ?

.....

Dans Adobe Draw ouvrir le projet Obus lancé par un canon. La trajectoire d'un obus est représentée dans le cas où la gravité est nulle. L'obus est également lancé avec une vitesse initiale v_0 de 30 m/s faisant un angle alpha de 60° avec l'horizontale. Les composantes de ce vecteur vitesse sont donc : $v_{0x} = 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $v_{0y} = 26 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$



Vous pourrez utiliser l'outil lignes (voir image ci-contre) pour tracer des droites dans la suite des activités, ou tracer directement si vous le souhaitez des droites directement au doigt sans outil sélectionné.

- **A partir de ce qui a été étudié précédemment dans la vidéo, construire rapidement au doigt, les positions du boulet à chaque seconde, puis tracer la trajectoire pressentie de l'obus lorsque $g=10 \text{ m/s}^2$.**
- L'obus touche-t-il la cible ?
- A quelle distance x est placée cette dernière ?
- **Vérifier vos résultats avec le simulateur.**

Stratégie préférentielle de visionnage de la vidéo

**Pour réaliser les activités demandées (après le premier visionnage), précisez la stratégie que vous avez préférentiellement utilisé pour le visionnage de la vidéo :
J'ai regardé la vidéo :**

- Une seule fois d'un seul bloc.
- Une seule fois en marquant des arrêts dans la vidéo (mise en pause).
- Une première fois entièrement puis par petits bouts (mise en pause).
- Une première fois entièrement puis par petits bouts (mise en pause et retour en arrière).
- Plusieurs fois mais à chaque fois en regardant les vidéos entièrement (sans mise en pause).
- Plusieurs fois en faisant des pauses et des retours en arrière réguliers.

Ressenti sur l'utilisabilité de la tablette

Pour réaliser ces activités j'ai trouvé :

	Pas du tout d'accord	Pas d'accord	Plutôt pas d'accord	Plutôt d'accord	D'accord	Tout à fait d'accord
que la tablette était facile à utiliser.	<input type="radio"/>					
qu'il était facile d'apprendre à utiliser la tablette.	<input type="radio"/>					
que l'on faisait peu d'erreurs en utilisant la tablette avec les applications proposées.	<input type="radio"/>					
que la tablette était pénible à utiliser.	<input type="radio"/>					
qu'utiliser la tablette me demandait beaucoup d'efforts.	<input type="radio"/>					

Ressenti sur l'efficacité de l'activité d'apprentissage

Suite à la réalisation de cette activité, pensez-vous êtes plus à même de comprendre le mouvement d'un objet dans le champ de pesanteur et selon les cas d'en déduire sa trajectoire.

Pas du tout d'accord. Pas d'accord. Plutôt pas d'accord. Plutôt d'accord. D'accord. Tout à fait d'accord.

Annexe 3 : Documents relatifs à l'expérience 3.

Activités de l'expérience 3 sur le simulateur.

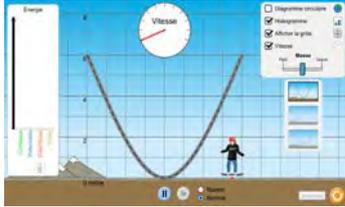
Lancer la simulation avec les conditions suivantes :

Mode : Introduction

Cocher : Histogramme, afficher la grille et vitesse.

Choisir le premier circuit

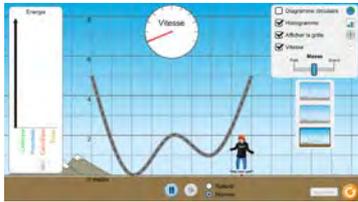
A1 : Positionner le skateur à une hauteur de 6 mètres. Observer et analyser le mouvement.



A2 : Positionner le skateur à une hauteur de 4 mètres. Observer et analyser le mouvement.

A3 : Positionner le skateur à une hauteur de 2 mètres. Observer et analyser le mouvement.

Choisir le troisième circuit :



A4 : Positionner le skateur à une hauteur de 3 mètres. Observer et analyser le mouvement.

A5 : Positionner le skateur à une hauteur de 2 mètres. Observer et analyser le mouvement.

A6 : Positionner le skateur à une hauteur de 1 mètres. Observer et analyser le mouvement.

Lancer la simulation avec les conditions suivantes :

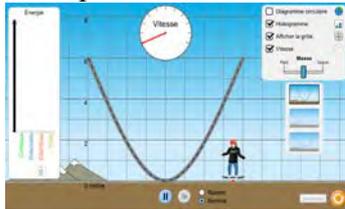
Mode : Frottements

Cocher : Histogramme, afficher la grille et vitesse.

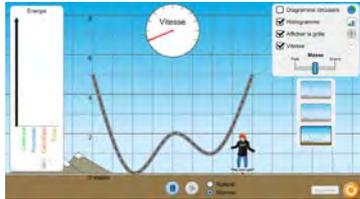
Choisir le premier circuit

A7 : Positionner le skateur à une hauteur de 6 mètres. Observer le mouvement.

Faire plusieurs essais en faisant varier les frottements.



Choisir le troisième circuit :



A8 : Positionner le skateur à une hauteur de 3 mètres. Observer le mouvement

Faire plusieurs essais en faisant varier les frottements.

Questionnaire post activités de l'expérience 3

Partie I : Rappel des relations.

Soit un skateur se déplaçant sur une rampe. A une date il se trouve au point A d'altitude z_A avec une vitesse v .

Question 1 :

La valeur de l'énergie cinétique du skateur dépendra de :

- de sa vitesse v .
- de son altitude z .
- de sa masse m .
- de sa vitesse et de sa masse.
- de sa masse et de son altitude.
- de sa vitesse et de son altitude.
- Je ne sais pas répondre

Question 2 :

La valeur de l'énergie potentielle du skateur dépendra de :

- de sa vitesse v .
- de son altitude z .
- de sa masse m .
- de sa vitesse et de sa masse.
- de sa masse et de son altitude.

- de sa vitesse et de son altitude.
- Je ne sais pas répondre

Question 3 :

L'expression de l'énergie cinétique E_c du skateur est :

- $\frac{1}{2} m g h$.
- $m.g.z$
- $mg.z^2$.
- $\frac{1}{2} m g h^2$.
- $\frac{1}{2} m v^2$.
- $\frac{1}{2} m g.v$.
- Je ne sais pas répondre

Question 4 :

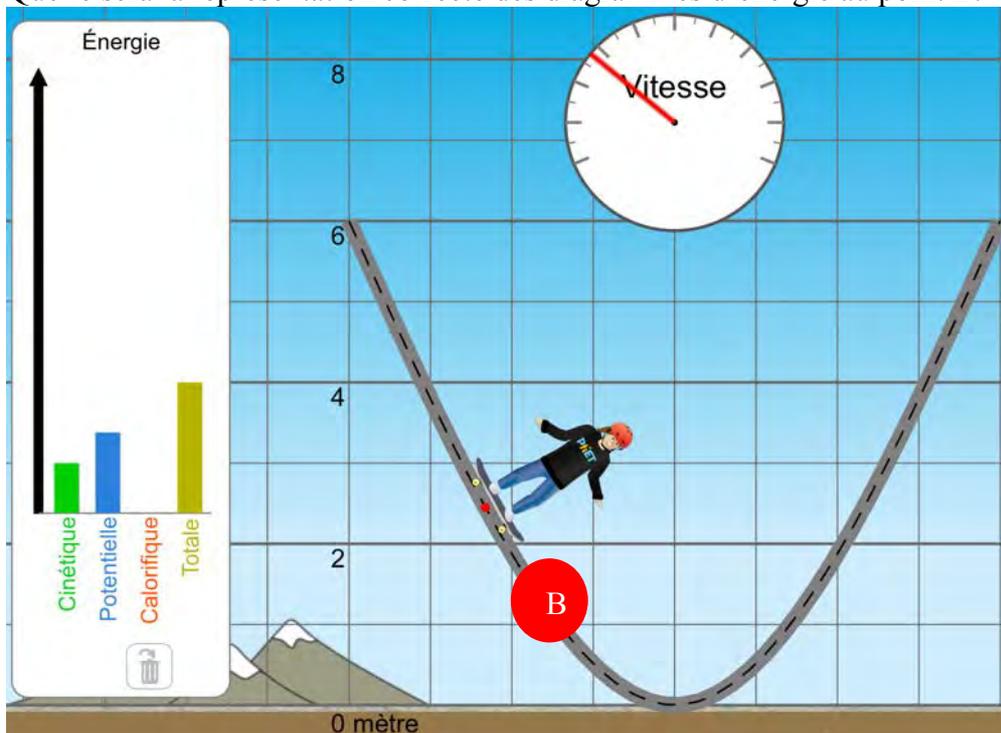
L'expression de l'énergie potentielle E_p du skateur est :

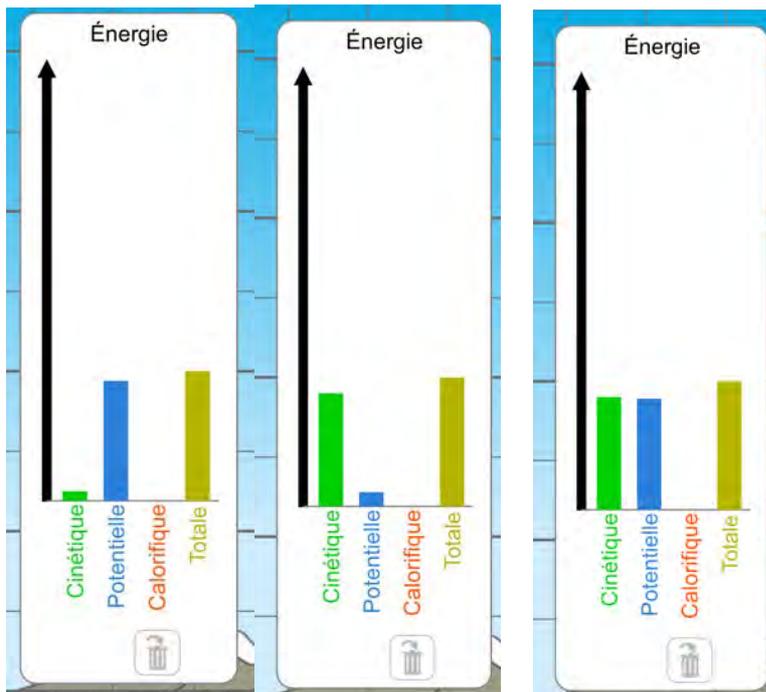
- $\frac{1}{2} m g h$.
- $m.g.z$
- $mg.z^2$.
- $\frac{1}{2} m g h^2$.
- $\frac{1}{2} m v^2$.
- $\frac{1}{2} m g.v$.
- Je ne sais pas répondre

Partie II : test APM 1 et 2

Question 5 : Le schéma ci-contre représente le skateur ainsi que les diagrammes des différentes énergies. Les frottements sont négligeables.

Quelle sera la représentation correcte des diagrammes d'énergie au point B.





Je ne sais pas répondre

Question 6 : Au point B son énergie cinétique :

- aura augmenté
- aura diminué
- sera restée constante
- je ne sais pas répondre

Question 7 : Au point B son énergie potentielle :

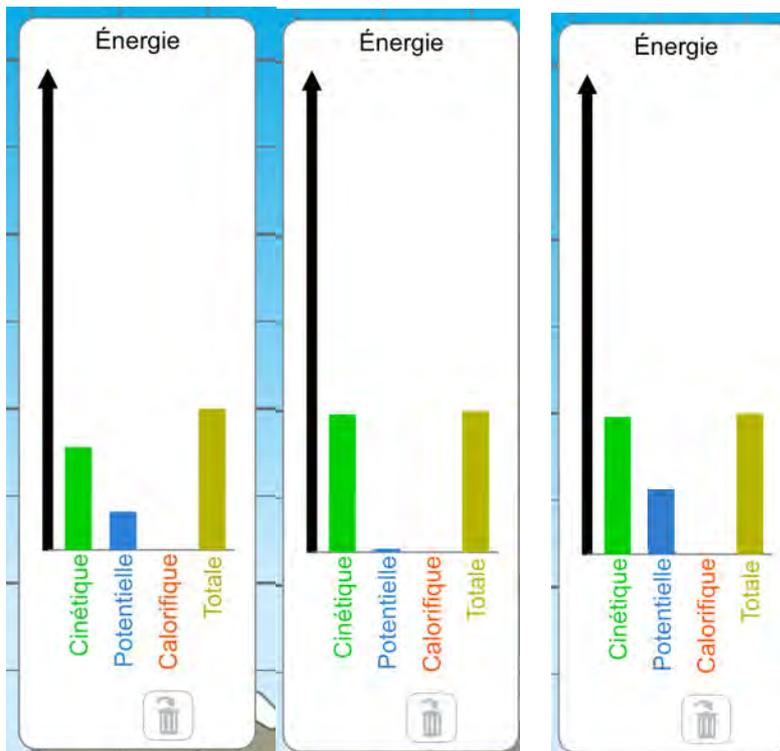
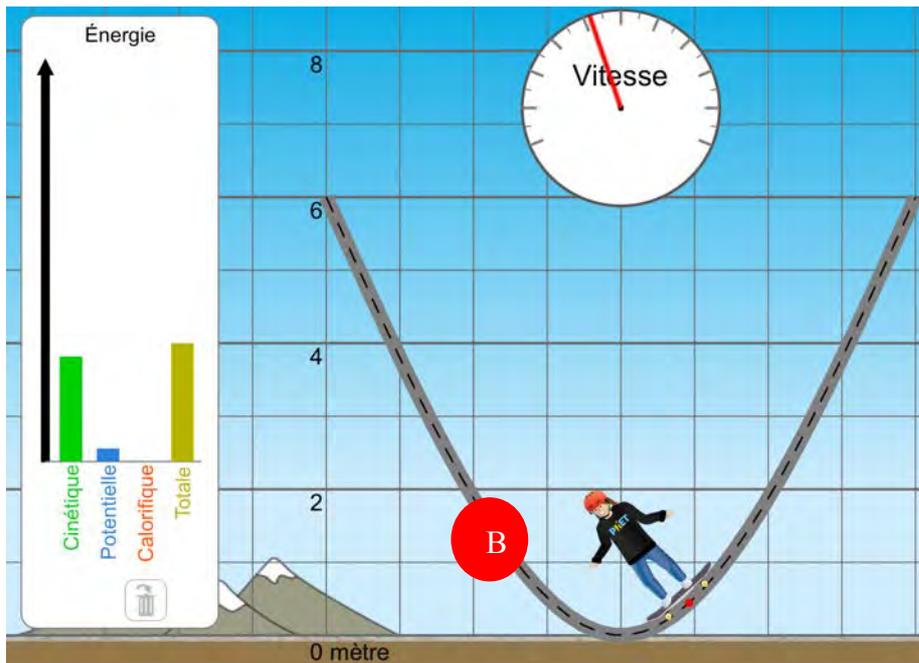
- aura augmenté
- aura diminué
- sera restée constante
- je ne sais pas répondre

Question 8 : Au point B son énergie mécanique :

- aura augmenté
- aura diminué
- sera restée constante
- je ne sais pas répondre

Question 9 : Le schéma suivant représente le skateur ainsi que les diagrammes des différentes énergies. Les frottements sont négligeables.

Quelle sera la représentation correcte des diagrammes d'énergie au point B.



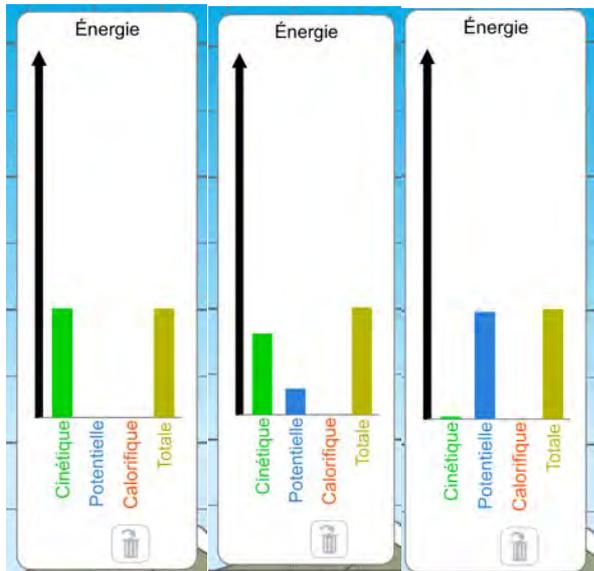
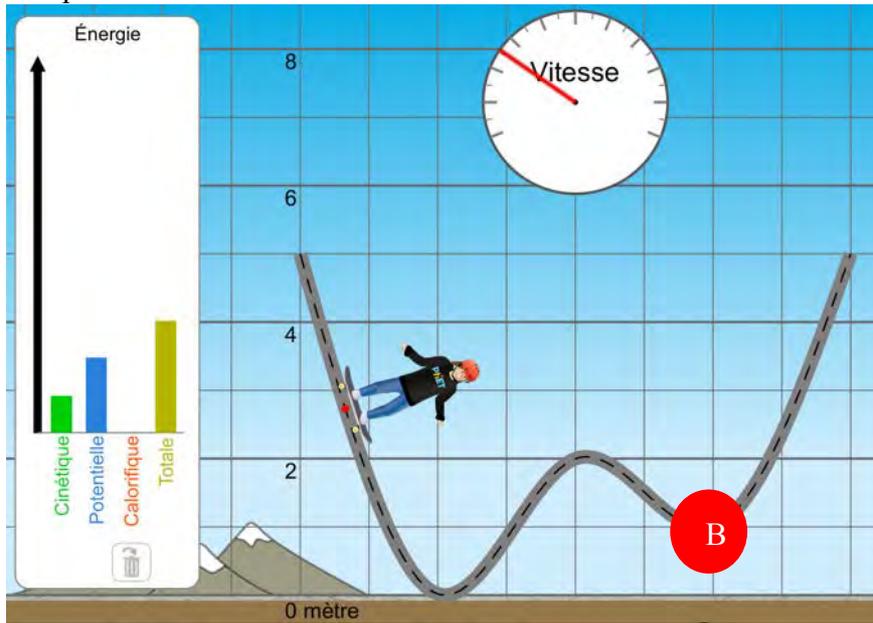
Je ne sais pas répondre

-
-
-
-

Question 10 :

Le skateur se trouve dans la situation 1 correspondant au schéma ci-contre :
Les frottements sont négligeables.

Parmi les représentations graphiques des différentes énergies proposées, dire laquelle est compatible avec la situation 1 :



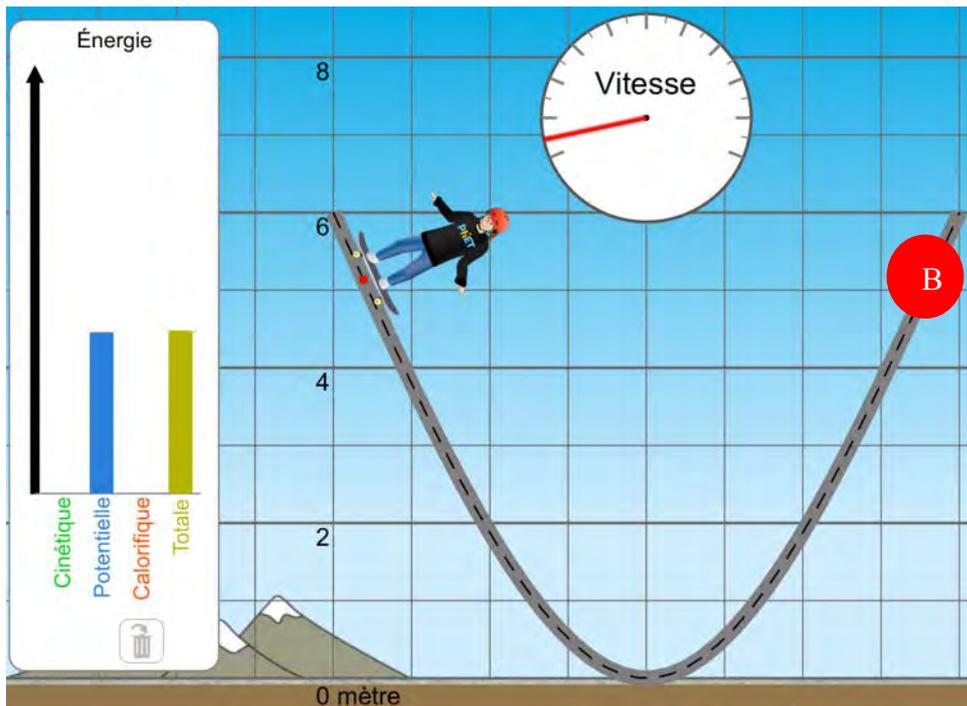
- Je ne sais pas répondre

Partie II : APM 4-5

Question 11 :

Le skateur se trouve dans la situation 1 correspondant au schéma ci-contre :
 Les frottements sont négligeables.

Le skateur pourra-t-il atteindre le point B ?



- Oui
- Non
- Je ne sais pas répondre

Question 12 :

Dans la même situation mais en présence de frottements :

Le skateur pourra-t-il atteindre le point B ?

- Oui
- Non
- Je ne sais pas répondre

Question 13 :

Le skateur se trouve dans la situation 1 correspondant au schéma ci-contre :

Les frottements sont négligeables.

Le skateur pourra-t-il atteindre le point B ?

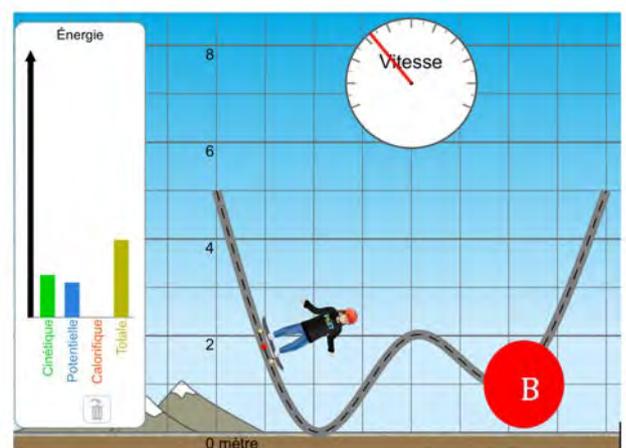
- Oui
- Non
- Je ne sais pas répondre

Question 14 :

Dans la même situation mais en présence de frottements :

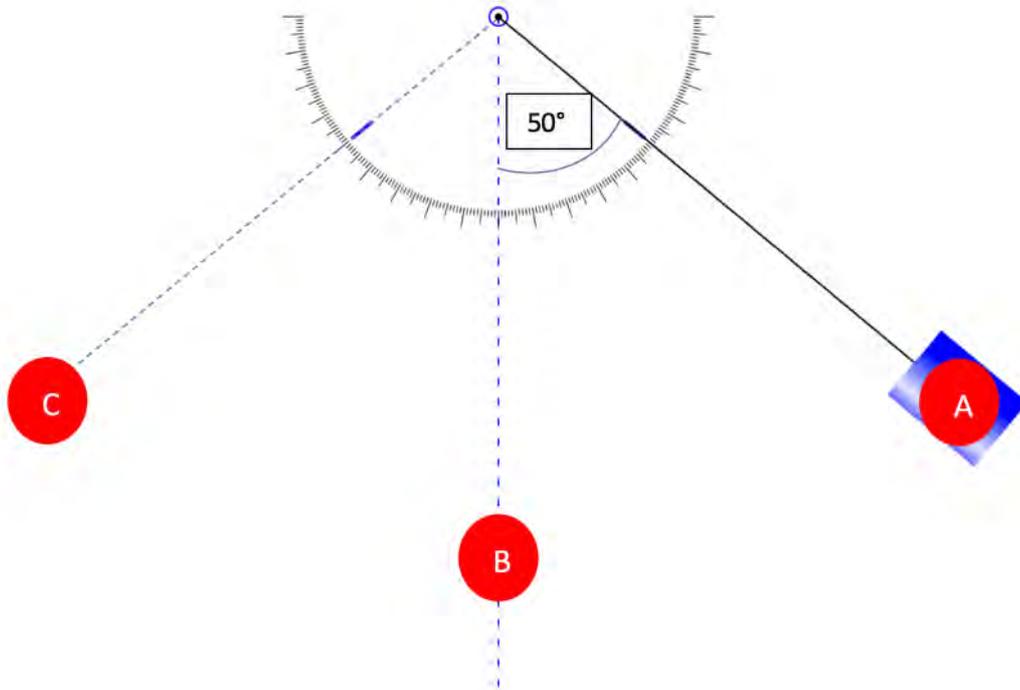
Le skateur pourra-t-il atteindre le point B ?

- Oui
- Non
- Je ne sais pas répondre



Partie III : Transfert

Soit le pendule ci-dessous. On repère l'angle du pendule par rapport à la verticale (sa valeur sera choisie positive dans les deux sens du mouvement). Dans l'exemple ci-dessous, le pendule est tenu fil tendu puis « lâché » depuis une position faisant un angle de 50° .



Question 15 :

La vitesse du pendule sera maximale

- en A seulement
- en C seulement
- en A et C
- en B
- entre A et C
- entre B et C
- Je ne sais pas répondre.

Question 16 :

L'énergie potentielle de pesanteur du pendule sera maximale

- en A seulement
- en C seulement
- en A et C
- en B
- entre A et C
- entre B et C
- Je ne sais pas répondre.

Question 17 : Le graphe ci-contre représente les différentes énergies du pendule au cours du mouvement. Ce graphe correspond à un angle du pendule :

- de 50°
- entre 0 et 25°
- entre 25 et 50°
- de 0°
- environ 25°
- Je ne sais pas répondre.

