

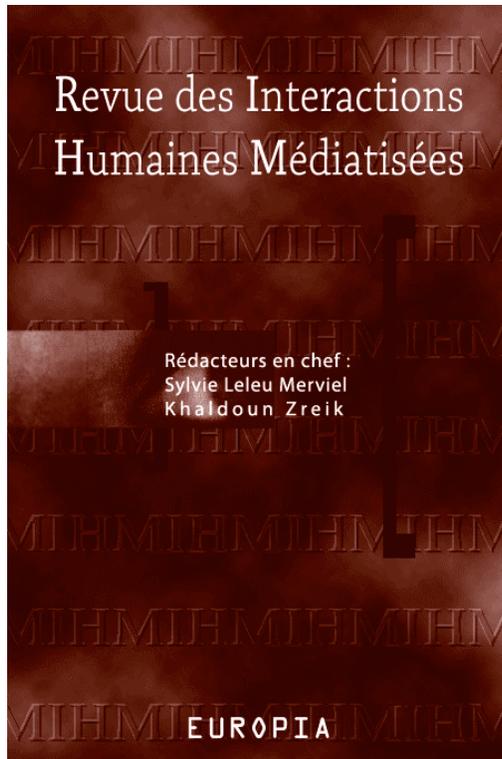
Revue des Interactions Humaines Médiatisées

Journal of Human Mediated Interactions

Rédacteurs en chef

Sylvie Leleu-Merviel & Khaldoun Zreik

Vol 15 - N° 1 / 2014



© Europia, 2014

15, avenue de Ségur,
75007 Paris - France

Tel (Fr) 01 45 51 26 07 - (Int.) 33 1 45 51 26 07

<http://europia.org/RIHM>

rihm@europia.org

Revue des Interactions Humaines Médiatisées

Journal of Human Mediated Interactions

Rédacteurs en chef / *Editors in chief*

- Sylvie Leleu-Merviel, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, Laboratoire DeVisu
- Khaldoun Zreik, Université Paris 8, Laboratoire Paragraphe

Comité éditorial / *Editorial Board*

- Thierry Baccino (Université Paris8, LUTIN - UMS-CNRS 2809, France)
- Karine Berthelot-Guiet (CELSA- Paris-Sorbonne GRIPIC, France)
- Pierre Boulanger (University of Alberta, Advanced Man-Machine Interface Laboratory, Canada)
- Jean-Jacques Boutaud (Université de Dijon, CIMEOS, France)
- Aline Chevalier (Université Paris Ouest Nanterre La Défense, CLLE-LTC, France)
- Yves Chevalier (Université de Bretagne Sud, CERSIC -ERELLIF, France)
- Didier Courbet (Université de la Méditerranée Aix-Marseille II, Mediasic, France)
- Viviane Couzinet (Université de Toulouse3, LERASS, France)
- Milad Doueïhi (Université de Laval - Chaire de recherche en Cultures numériques, Canada)
- Pierre Fastrez (Université Catholique de Louvain, GReMS, Belgique)
- Pascal Francq (Université Catholique de Louvain, ISU, Belgique)
- Bertrand Gervais (UQAM, Centre de Recherche sur le texte et l'imaginaire, Canada)
- Yves Jeanneret (CELSA- Paris-Sorbonne GRIPIC, France)
- Patrizia Laudati (Université de Valenciennes, DeVisu, France)
- Catherine Loneux (Université de Rennes, CERSIC -ERELLIF, France)
- Marion G. Müller (Jacobs University Bremen, PIAV, Allemagne)
- Marcel O'Gormann (University of Waterloo, Critical Média Lab, Canada)
- Serge Proulx (UQAM, LabCMO, Canada)
- Jean-Marc Robert (Ecole Polytechnique de Montréal, Canada)
- Imad Saleh (Université Paris 8, CITU-Paragraphe, France)
- André Tricot (Université de Toulouse 2, CLLE - Lab. Travail & Cognition, France)
- Jean Vanderdonckt (Université Catholique de Louvain, LSM, Belgique)
- Alain Trognon (Université Nancy2, Laboratoire InterPsy, France)

Revue des Interactions Humaines Médiatisées

Journal of Human Mediated Interactions

Vol 15 - N° 1 / 2014

Sommaire

Editorial

Sylvie LELEU-MERVIEL, Khaldoun ZREIK (Rédacteurs en chef) 1

Rituels télévisuels et connexions métropolitaines dans la Cosmopolis luxembourgeoise

Television rituals and metropolitan ties in the Cosmopolis of Luxembourg

Christian LAMOUR, Nathalie LORENTZ 3

Un système de navigation pour optimiser la recherche d'information sur le web

A navigation system that improves information retrieval on the web

Mohamed DJOUANI, Stéphane CARO DAMBREVILLE, Jean-Michel BOUCHEIX 21

Interactions tactiles sur tablettes pour l'apprentissage de la géométrie dans l'espace : présentation et premières évaluations

Tactile interactions on tablets for learning geometry in space: presentation and first assessments

Robin VIVIAN, David BERTOLO, Jérôme DINET 51

Analyse simondienne de l'otakisme et du robotisme japonais

Simondian analysis of Japanese otakism and robotism

Nicolas OLIVERI 91

Editorial

R.I.H.M., *Revue des Interactions Humaines Médiatisées*, aime à croiser les regards pluri-disciplinaires, tout en restant centrée sur la science de l'information-communication. Elle est du reste qualifiante dans cette discipline, puisqu'elle figure sur la liste AERES-CNU de 71^{ème} section. Nous avons indiqué au dernier numéro qu'elle gagnait en sélectivité, arrivant aujourd'hui à un taux de sélectivité d'environ 50%. Son rayonnement s'internationalise également. Comme la précédente, la présente parution s'ouvre ainsi sur un article luxembourgeois.

En effet, le premier article porte sur les routines de consommation audiovisuelle dans le Grand-Duché. Dans ce contexte où plusieurs communautés nationales coexistent, l'article examine si l'outil télévisuel est mobilisé par l'individu pour s'ouvrir à la diversité et la complexité communautaire de son espace de vie, ou au contraire s'il ravive un lien national dissous dans la Cosmopolis luxembourgeoise.

Le deuxième article présente les effets d'un dispositif technique dont le but est de faciliter la navigation dans les documents numériques. L'expérimentation, conduite avec 59 participants, compare les effets produits dans trois conditions expérimentales d'un site d'agence immobilière spécialement conçu pour l'étude. La méthode de l'enregistrement des mouvements oculaires (Eye-Tracking) est employée en vue d'obtenir des indicateurs destinés à mieux comprendre les stratégies d'exploration visuelle et d'autre part, de donner une indication précise sur les ressources cognitives investies durant la tâche.

Le troisième article envisage les interactions tactiles sur tablettes pour l'apprentissage de la géométrie dans l'espace. Il présente la problématique, analyse les besoins correspondants et montre le manque de solutions existantes avant de proposer un prototype avancé de logiciel et les premières évaluations effectuées auprès d'un public cible (enfants de 9 à 11 ans) et d'utilisateurs tout venant.

Enfin, le dernier article s'appuie sur un phénomène culturellement identifié, l'*otakisme* japonais, mais également sur le *robotisme* qui en découle, pour proposer une autre lecture de la relation ambiguë entre culture et technique, généralement située au carrefour d'un angélisme technophile béat ou d'une diabolisation technophobe réductrice. L'enjeu est de parvenir à réinsuffler au centre du discours sur la technique toute une dimension humaine et sociale, nichée au cœur de la culture technique.

Nous vous souhaitons à toutes et à tous une très bonne lecture et nous vous remercions de votre fidélité.

Sylvie **LELEU-MERVIEL** et Khaldoun **ZREIK**
Rédacteurs en chef

Interactions tactiles sur tablettes pour l'apprentissage de la géométrie dans l'espace : présentation et premières évaluations

Tactile interactions on tablets for learning geometry in space: presentation and first assessments

Robin VIVIAN (1), David BERTOLO (2), Jérôme DINET (3)

(1) Perseus, Université de Lorraine Metz
robin.vivian@univ-lorraine.fr

(2) Lcoms, Université de Lorraine Metz
david.bertolo@univ-lorraine.fr

(1) Perseus, Université de Lorraine Metz
jerome.dinet@univ-lorraine.fr

Résumé. Tablettes munies d'écrans tactiles, interfaces multi-touch et capteurs divers prennent une place de plus en plus importante dans notre communication quotidienne. Simples gadgets dans un premier temps, ces interfaces deviennent un élément prépondérant dans le choix des utilisateurs, ce qui oblige les développeurs et concepteurs d'interface à repenser les modes d'interaction. Aujourd'hui, de plus en plus d'écoles souhaiteraient introduire ces terminaux tactiles comme nouveaux supports pédagogiques, mais les logiciels d'apprentissage ne sont que très rarement développés spécifiquement pour tirer le meilleur parti de ces tablettes tactiles. Avec ce nouveau type de dispositif, de nouvelles interactions sont possibles. Un grand nombre d'études ont été faites sur la manipulation d'objets 3D avec des périphériques d'entrée 2D (traditionnellement des claviers et des souris) mais très peu de travaux ont cherché à montrer l'apport des interactions tactiles dans des apprentissages adaptés, comme par exemple la géométrie dans l'espace. Dans cet article, nous présentons ces besoins et nous montrons le manque de solutions existantes avant de proposer un prototype avancé de logiciel et les premières évaluations effectuées auprès d'un public cible (enfants de 9 à 11 ans) et d'utilisateurs tout venant. Nous expliquerons les choix et solutions implémentées pour répondre à quelques problèmes fondamentaux de la manipulation dans l'espace à savoir les translations et les rotations dans l'espace dans le contexte de l'apprentissage de la géométrie 3D. Nous exposerons un ensemble cohérent et innovant d'interactions avec toujours comme souci principal de proposer une alternative complémentaire, un outil supplémentaire d'apprentissage. Nous concluons en présentant des solutions implémentées dans notre application Fingers® qui sont ou seront en phase de test auprès de notre public cible.

Mots-clés. Apprentissage, Interactions, gestion 3 DOF, tactile, Géométrie 3D.

Abstract. Tablets with touch-screens, multi-touch interfaces and various sensors are becoming increasingly common. More and more schools are testing them with their pupils in the hope of bringing pedagogic benefits. Thanks to this new type of device, new sets of interactions can be thought of. Many studies have tested user reception of innovative interactions. At the present time, pedagogic benefits can be evaluated to resolve 3D geometry problems. In this paper, we used an already accepted set of interactions to manage rotation of solids and we evaluated its pedagogic benefit on a test group of learners aged 9 to 15. We propose a protocol based on mathematics didactic and pedagogy. We compared the set of interactions with classic sheets of paper and solids. Our results show that using our set of interactions increase significantly good answers.

Keywords. e-Learning tools; 3D user interface; Interactions; tablets touchscreen; multi-touch; 3DOF; rotations; child-computer interaction.

1 Introduction et cadre théorique

Comme lors de l'introduction dans les écoles des premiers ordinateurs dans les années 1990 avec les demeures célèbres MO5©, puis l'arrivée massive des ordinateurs portables dans les années 2000, cette décennie semble être celle d'une interrogation sur une pédagogie centrée sur les tablettes tactiles. Les initiatives des mairies, des conseils généraux voire de régions pour doter les écoles sont certes louables, mais les mêmes causes engendrant les mêmes effets, nous risquons de remiser au placard rapidement un autre gadget électronique si des efforts pour concevoir une pédagogie adaptée ne sont pas faits. Bruce Schneier (CTO Counterplane auteur de *Applied Cryptography*, and an award winner at the EFF Pioneer Awards. @Etech 2007) disait la chose suivante : « Si vous pensez que les technologies peuvent résoudre tous vos problèmes, alors vous n'avez rien compris à vos problèmes ni aux technologies ». Nous pensons que les technologies étaient « péda-go-suffisantes » pour les M05© et les ordinateurs portables, il serait dommage de commettre la même erreur avec les terminaux tactiles. Notre projet s'inscrit clairement dans une problématique de développement d'outils pédagogiques ciblés pour l'apprentissage de la géométrie dans l'espace dont les aspects cognitifs, conceptuels, et manipulatoires s'inscrivent parfaitement dans le cadre d'un apprentissage ayant comme support des terminaux tactiles.

Pour développer notre projet, nous nous sommes appuyés sur des conclusions de séances de travail faites avec des enseignants et des élèves enseignants (ex IUFM nouvellement ESPE) autant que sur les attentes exprimées par les élèves de primaire voire de collège. Notre démarche était globale et nous avons cherché à exploiter au mieux les nouvelles fonctionnalités des tablettes comme par exemple le gyroscope ou l'accéléromètre.

Notre retour des expériences utilisateurs menées montre plusieurs choses :

- que les élèves acceptent notre approche et s'approprient facilement ce nouveau mode d'interactions. Si nous n'avions pas de doute sur l'aspect attractif des terminaux mobiles, nous étions plus dans l'expectative sur l'efficacité des interactions ;
- que globalement l'outil augmente le taux de réussite pour résoudre des problèmes de géométrie 3D ;
- que la technologie est très majoritairement acceptée par les utilisateurs potentiels (élèves, enseignants) ;

- que la technologie n'introduit jamais une composante de complexité supplémentaire.

Nous présentons les résultats obtenus sur deux études distinctes. La première concerne la problématique de gestion des rotations dans l'espace à la fois des objets constituant une scène de travail, mais aussi celle de la gestion du point de vue et du point visé de l'observateur. La seconde étude concerne une enquête d'opinion (basée sur des tests utilisateurs) sur la facilité d'utilisation d'un geste tactile pour déplacer des objets suivant les 3 dimensions.

Nous concluons cette étude en présentant comment nous avons étendu notre grammaire de gestes pour construire de nouvelles fonctionnalités qui représentaient soit des problèmes complexes (comme la sélection paramétrée) soit des actions inadéquates au tactile comme l'attribution d'une couleur (avec nos contraintes initiales comme l'absence de menus).

2 Les interactions tactiles 3D

2.1 Classification des gestes

L'étude du sens des gestes communicants se heurte à un certain nombre de problèmes. Le premier est sans doute une absence de standardisation plus ou moins formelle comme cela peut exister par exemple dans le langage des signes. Le second est l'absence de segmentation linéaire, voire de combinatoire d'unités élémentaires. C'est sans doute pour cela que la majorité des chercheurs contemporains ont proposé des classifications fonctionnelles basées sur le rapport du geste avec l'activité parolière et/ou sur la valeur pragmatique qui en découle.

Dans la nuit des temps de l'interface informatique, ou presque puisque nous étions en 1941, Efron (1941) nous expliquait que les gestes humains (non limités aux doigts, aux mains comme dans notre travail) sont identifiables suivant 5 critères qui resteront les bases des classifications futures. Ces catégories sont, en gardant les termes anglais : la « *physiographics* » pour ce qui relève d'une production naturelle, l'« *ideographics* » qui nous donne le processus de réflexion, la « *deictics* » qui sert à identifier des objets particuliers, la « *kinetographics* » qui décrit le mouvement d'un être vivant et la catégorie « *Baton* » qui exprime ou souligne un mot spécifique. Ekman et Freisen (1969) reprendront et développeront cette catégorisation afin d'en affiner la description en proposant cinq grandes catégories et onze sous catégories.

En 1991, Tang (1991) observe un groupe de personnes travaillant de manière collaborative autour d'une table à dessin. La gestuelle utilisée pour réaliser ce travail en commun va fournir de grandes indications sur les focalisations spatiales dans le milieu du travail, les zones d'intérêt et les échanges ou référencements inter-groupe. Ces concepts ont été formalisés en fonction d'un contexte d'utilisation et des études ont affiné l'utilisation de surfaces tactiles par des utilisateurs isolés (citons les travaux de Weller (1993)) ou en groupe (citons les travaux de Morris *et al.* (2006)) dans des environnements différents y compris celui du divertissement (citons par exemple les travaux de Wilson en 2005). L'objectif principal de ces travaux était de montrer que l'utilisation d'une interface tactile était tout aussi efficace voire plus efficace que les interfaces traditionnelles que pouvaient être le clavier, la souris et autres périphériques d'entrée.

Comme souvent, les interactions ont été définies par les concepteurs de systèmes qui généralement possèdent une logique de raisonnement et des méthodes de fonctionnement propres, parfois hermétiques voire obscures, souvent inadéquates et presque toujours arbitraires. Mais quels types de gestes peut bien réaliser un

utilisateur tout venant ? Comment celui-ci se représente mentalement l'interaction ? « Combien de doigts vais-je utiliser pour caractériser cette action ? ». En 2003, Nielsen propose une procédure permettant de développer des interfaces informatiques gestuelles intuitives et ergonomiques (Nielsen *et al.*, 2003). Bien que ces critères soient importants pour réaliser les premiers prototypes, ils ne sont pas déterminants pour discriminer les gestes qui seraient effectués par les utilisateurs.

Wobbrock présente en 2009 (Wobbrock *et al.*, 2009) une étude où vingt utilisateurs sont mis à contribution pour définir une bibliothèque de gestes pour des interactions avec des surfaces tactiles. Les auteurs présentent aux vingt participants une suite de vingt-sept commandes et leur demandent d'associer, d'inventer, d'imaginer les interactions correspondantes. Ces commandes ont des degrés de complexité et d'exécution croissants. Ils recueilleront plus de mille gestes qu'ils répartiront manuellement en 4 catégories :

- **Form** : qui regroupe les actions de contact (*static pose, one point touch, dynamic pose and path*, etc).
- **Nature** : qui regroupe les gestes symboliques, métaphoriques, etc.
- **Binding** : qui regroupe les gestes relatifs à la modification d'un objet (taille, localisation, dépendance, etc).
- **Flow** : regroupe les gestes continus reconnus comme étant la représentation d'une action (tracé d'un point d'interrogation pour obtenir de l'aide par exemple).

Les auteurs soulèvent un problème lié au principe de l'approche même, à savoir les biais et le changement de comportement liés à la rétroaction. Les utilisateurs n'avaient pas la possibilité de revenir sur les choix de gestes, ce qui indubitablement impliquait que les solutions proposées ne représentaient pas l'interaction optimum pour réaliser l'action.

A l'opposé de cette approche de catégorisation provenant de l'observation comportementale, se trouve une approche dite de bas niveau qui consiste à reconstruire une bibliothèque de gestes en partant d'une grammaire et en formalisant les actions basiques de l'utilisateur.

2.2 Formalisation d'une grammaire de gestes multi-touch

L'objectif de l'ensemble des travaux effectués autour de la formalisation des grammaires de gestes pour terminaux tactiles, est de concevoir un standard, ou du moins une généralisation des méthodologies d'interaction. L'idée sous-tendue est bien évidemment celle de la réutilisabilité de concepts ou ici les bibliothèques de gestes (Lao *et al.*, 2009). Le but est de concevoir un système fonctionnel permettant d'associer à un système formel les actions et les intentions de l'utilisateur. Görg propose en 2010 (Görg *et al.*, 2010) un cadre pour une reconnaissance et une représentation restreinte d'interactions multi-touch. Le concept de définition de grammaire est à la base un problème de logique formelle (au même titre que les grammaires de langue). Concevoir une grammaire peut être un véritable défi pour des concepteurs n'ayant pas les connaissances théoriques suffisantes (parfois même pour ceux qui maîtrisent le domaine). Kaindl souligne ces limites dans ses travaux d'élaboration d'un framework de développement dédié aux interfaces tactiles (Kaindl, 2010).

Généralement, les cadres de développement d'interfaces tactiles offrent un ensemble de gestes standard (zoom, rotations, etc) qu'il est facile de réutiliser quand on développe des applications ne demandant pas de manipulations complexes d'objets (visualiser des photos, déplacer des pièces aux échecs, etc). Par contre, définir de nouvelles interactions ou les concevoir pour un domaine particulier

comme par exemple la géométrie 3D, demande de revenir à des notions de bas niveau comme la détection de points de contact, la vérification de trajectoire ou encore la dissociation des actions. En 2010, Kammer *et al.* (2010) propose, au travers l'application GEFORMT (GEsture FOrmalization for Multi-Touch) et en accord avec les travaux de Nespoulos *et al.* (1986), une approche du problème basée sur des valeurs sémiotiques, autrement dit sur l'interprétation des signes et des symboles. Comme pour le langage (écrit, parlé) ou la programmation informatique, la définition d'une grammaire de gestes doit respecter à la fois des règles syntaxiques, sémantiques et pragmatiques. La syntaxe d'un langage décrira les symboles de base utilisés ainsi que leurs combinaisons, la sémantique donnera une signification, du sens, et la pragmatique tiendra compte de la représentation mentale de l'utilisateur. GEFORMT intègre ces trois aspects dans sa formalisation.

Ces grammaires sont souvent définies pour des applications spécifiques. Nous entendons par là qu'elles sont souvent contextualisées et que les gestes ou séquences de gestes n'ont de signification que pour l'application développée. Quand l'espace de l'interface et l'espace d'interaction sont dans le même domaine dimensionnel (par exemple 2D) la correspondance Action/Application est souvent abordable. Par contre quand le degré de l'espace d'application est supérieur à celui de l'interface (2D pour les tablettes, 3D pour les mondes virtuels) il faut artificiellement intégrer cette dimension supplémentaire dans la grammaire gestuelle.

2.3 Les Z techniques

S'il est relativement aisé de concevoir des interactions tactiles adaptées à des manipulations courantes d'objets, définir une grammaire de gestes spécifique à des interactions en trois dimensions, introduit d'autres contraintes bien plus complexes. Il existe deux grandes méthodes d'interactions 3D. La première est issue des principes utilisés en dessin industriel. Globalement l'espace de travail est divisé en plusieurs espaces (généralement 4) dans lesquels sont affichées une vue de dessus, une vue de face, une vue de côté et une vue observateur. Pour manipuler des objets, l'utilisateur va successivement travailler dans les différentes fenêtres, ses actions étant instantanément répercutées sur les différents espaces. L'avantage principal est que l'utilisateur ne manipule que des mondes en deux dimensions ce qui facilite la manipulation des données (Hancock *et al.*, 2006). La seconde méthode d'interaction consiste à travailler directement dans l'espace utilisateur et donc de manipuler les trois dimensions (en fait 6 si nous comptons trois translations et trois rotations voire 12 si nous manipulons aussi l'observateur). Cette seconde approche demande une appropriation de l'espace qui n'est pas toujours évidente pour l'utilisateur tout-venant (Reiman *et al.*, 2009)(Hancock *et al.*, 2006).

Un certain nombre d'études ont été menées pour comparer ces deux approches. Martinet (2010a) montre que les deux méthodes sont pratiquement équivalentes d'un point de vue efficacité et efficacité et ce quelle que soit la précision de la manipulation ou du positionnement d'objets. Dans une expérimentation, l'auteur mesure le temps mis par un utilisateur pour superposer deux éléments (à un epsilon près). La première partie de l'expérience s'effectue avec une interface multi-fenêtrée (avec des vues classiques). La seconde partie impose à l'utilisateur la gestion des trois dimensions, les déplacements X et Y étant associés à un contact de la main droite, la composante Z est quant à elle gérée par un point de contact de la main gauche. Bien que la dissociation psychomotrice des deux actions soit plus complexe à effectuer (Ah les vieux souvenirs des leçons de piano resurgissent) l'opérateur obtient des résultats similaires à la technique multi-vues.

La subdivision de l'espace de visualisation et donc de l'espace d'interaction s'avère être un handicap majeur si les applications sont développées pour des terminaux tactiles de type tablette. Si la séparation des DOF (main gauche/main droite) s'adapte bien à des terminaux de grande dimensions comme la table tactile de Microsoft® (Martinet, 2010b), il convient de réfléchir à des modes d'interaction différents avec des surfaces de quelques pouces de diagonale, ne serait-ce qu'à cause de la stabilité du terminal.

Formaliser une syntaxe d'interaction multi-touch impose une connaissance exhaustive des gestes que peut produire un utilisateur. Kammer (2010) propose une grammaire de gestes simples à utiliser quand on développe des applications tactiles. Il définit une grammaire de gestes adaptée et construit des gestes complexes comme celui de la spirale par deux demi-cercles combinés dans un mouvement continu croisé (Figure 1). Ce geste simple à réaliser par un utilisateur lambda s'avère extrêmement complexe à identifier d'un point de vue informatique.

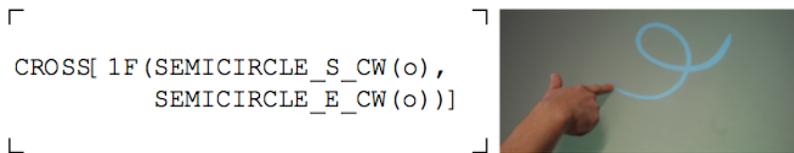


Figure 1. Définition de la notion de spirale selon Kammer et gestuelle associée

2.4 Les interactions 3D

Souris et clavier étaient traditionnellement utilisés pour gérer les translations dans l'espace, les transformations géométriques comme les extrusions ou les déformations homothétiques ou encore des rotations souvent barycentriques. La principale difficulté était de traduire un geste souvent réalisé avec des périphériques 2D comme la souris (voire 1D comme le clavier) en un mouvement 3D. Un des principes souvent développé a été l'ajout informationnel dédié spécifiquement à la notion de manipulation. Ces apports informationnels ont été identifiés sous le terme Widgets qui provient de la contraction de Windows Gadgets. Les Widgets sont généralement utilisés pour faciliter une interaction avec un objet assigné. En 1986, Bier (1986) dans « Skitters et Jacks » introduit deux classes de widgets : « ancrés » et « état final » pour un placement précis de formes les unes par rapport aux autres. Depuis cette première définition et le renforcement de l'interface tactile, les widgets utilisés dans la manipulation 3D évoluent en permanence. En 2009, Moscovich (2009) montre comment concevoir des widgets pour écran tactile qui répondent à la zone de contact d'un doigt et définit des limites à la conception des interactions basées sur des Widgets coulissantes. Imaginer de nouvelles interactions (grammaire des gestes) est devenu une nécessité. Une première orientation a été développée par Bimber en 2000 avec la notion de sketching (Bimber, 2000). L'utilisateur dessinait à l'écran une trajectoire que le système associait à un objet. Cela permettait de simplement construire l'outil de contrôle d'un avatar (Figure 2).



Figure 2. L'avatar se déplace en fonction d'une trajectoire dessinée sur l'écran

En 2008, (Schmidt *et al.*, 2008) présente une interface pour la manipulation d'objets 3D dans laquelle les outils de transformation classiques sont remplacés par des widgets 3D transitoires invoquées par interactions et traduites en actions (dans son cas, des sketches) dépendantes d'un contexte (Figure 3).

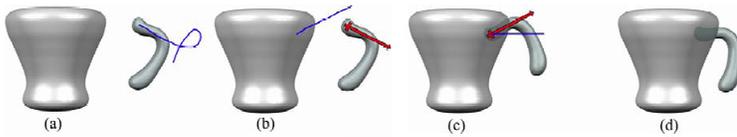


Figure 3. Utilisation de *Sketching* pour la manipulation d'objets 3D

Les auteurs vont appliquer ce principe d'élément rattaché à la notion de manipulation d'éléments dans l'espace. Ils associent à l'objet sélectionné des widgets de manipulation pour gérer plus simplement les translations et les rotations dans l'espace utilisateur. La figure 4 donne un exemple de widgets associés.

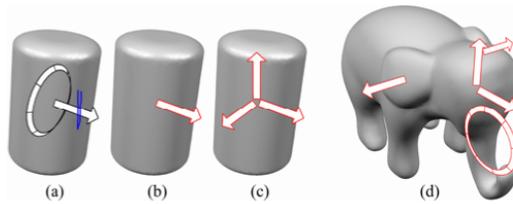


Figure 4. Les widgets sont "épinglés" à l'objet sélectionné (a). Les widgets épinglés ont une bordure rouge (b), et restent actifs si d'autres widgets sont ajoutés (c). Les widgets épinglés persistent à travers les changements de sélection, permettant aux systèmes un assemblage arbitraire de widgets (d)

Ces widgets sont basés sur des métaphores qui étaient utilisées dans les logiciels de CAO et de modélisation de manière générale comme par exemple Blender© ou 3DS max© (Figure 5).

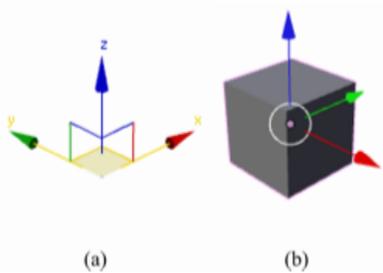


Figure 5. Translations suivant les 3 axes sous 3DS max (a) et Blender (b)

Certaines études explorent les contrôles multi-touch pour manipuler plusieurs degrés de liberté en même temps. (Hancock *et al*, 2009) a proposé d'utiliser de un à trois doigts pour manipuler des objets dans la direction de profondeur. Martinet, Casiez et Grisoni (2010c) explorent la conception d'interactions de positionnement 3D (sur des écrans tactiles multi-touch) avec comme objectif d'augmenter les degrés de liberté. Leur but est multiple : dans un premier temps, ils étudient un concept issu du dessin industriel et des premiers logiciels de CAO dédiés à la modélisation, à savoir une gestion multi-fenêtrée de la scène (vue dessus, dessous, droite, gauche, etc) en ajoutant un système de téléportation à l'intérieur d'un même espace (Figure 6 (2) et (3)). Pour le second, ils introduisent une technique conçue pour permettre un positionnement 3D libre avec une vue unique de la scène : la-Z technique (Figure 6 (1)). Lorsque le premier doigt est en contact avec la surface, un rayon ayant comme origine le centre de la caméra et passant par le point de contact écran est simulé, un calcul d'intersection avec les objets de scène est effectué et l'objet le plus proche est retourné. Ce premier contact, normalement la main droite, contrôle les mouvements dans les directions X et Y. Ce contact doit être direct, c'est-à-dire que le doigt doit être sur l'objet.

Quand un deuxième doigt est en contact indirect (pas sur l'objet) avec la surface (la main gauche), les auteurs récupèrent l'amplitude de déplacement sur la surface et utilisent le mouvement haut-bas pour contrôler la position de profondeur. Dans la pratique, un paramétrage du pas permettra à l'utilisateur d'effectuer soit un positionnement précis ou de grands déplacements. Avec un peu de synchronisation et d'entraînement, il est possible de gérer les trois degrés de liberté simultanément.



Figure 6. (1) Z-technique (2,3) multi-vues

A partir d'une petite étude préliminaire, (Cohé *et al*. 2010) montrent qu'il devient difficile de contrôler les différents DOF (Degree Of Freedom) à partir du moment où les éléments graphiques sont proches les uns des autres dans la scène. Il note qu'il est difficile de contrôler tous les degrés de liberté quand ils sont affichés en même temps. Ils proposent alors une approche alternative et construisent une T-box contrôlée avec un doigt (Figure 7).

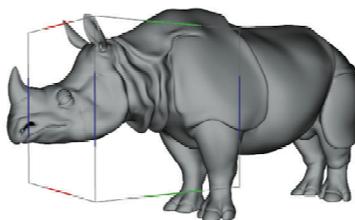


Figure 7. Une T-Box permet de contrôler 9 DOF

Ils transforment le mouvement d'un doigt sur le cube affiché dans l'espace de l'écran en une rotation de l'objet sélectionné. Techniquement, une transformation linéaire est appliquée entre les gestes des utilisateurs et des rotations de T-box (Figure 8).

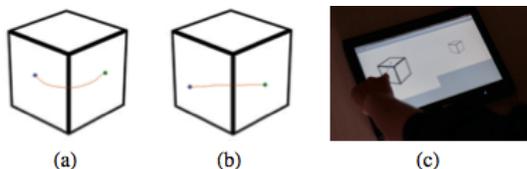


Figure 8. Exemple de gestes de contrôle de la T-box et la configuration de l'application (c)

Enfin Reisman *et al.* (2009) propose de nouveaux modes d'interactions qui prennent en compte la perspective et ne sont donc pas tributaires d'environnements conventionnels. Ils montrent comment étendre leurs méthodes d'interaction pour atteindre les objectifs de contrôle spécifiques de l'application (Figure 9).

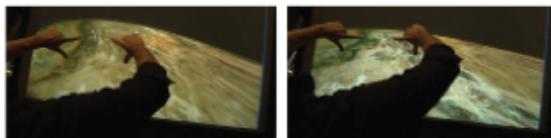


Figure 9. Changement de point de vue effectué avec 4 doigts

3 La géométrie dans l'espace à l'école

De nombreuses études sont menées pour étudier les problématiques d'interactions effectuées par des personnes adultes (adolescent, personnes âgées, personnes à autonomie réduite, etc) mais très peu s'intéressent aux comportements des enfants et pré-adolescents. Notre étude se focalise sur l'apprentissage de la géométrie dans l'espace, notion qui commence à être enseignée en cycle primaire à partir du CM2 (9-10 ans) et qui se poursuit dans le secondaire en 6ème et 5ème (11 et 12 ans). A cette période, la conceptualisation et la capacité d'analyse en 3 dimensions sont souvent délicates et posent chez ces élèves de réels problèmes d'interprétation, de manipulation et de résolution de problèmes. Plus spécifiquement, le but de notre travail est d'apporter une solution efficace et abordable à la construction, l'interprétation et la manipulation de solides dans l'espace dans un cadre d'apprentissage de la géométrie. Mathématiquement, certaines notions sont complexes à appréhender chez l'enfant. Il paraît par exemple naturel qu'une rotation autour du centre de gravité soit une composition de rotations autour de différents axes, mais les élèves ne sont pas toujours conscients du fait que dans l'espace, une rotation autour d'un point n'existe pas. L'introduction d'un support d'apprentissage comme une tablette tactile peut aussi introduire un certain nombre de biais pas toujours évidents à anticiper. Certains biais se retrouvent sous une forme proche dans les apprentissages conventionnels, parfois les contraintes sont spécifiques au support et viennent s'ajouter à la problématique de l'apprentissage. Citons par exemples et de manière non exhaustive :

- La difficulté d'oublier le support de l'apprentissage, support qui, lorsque celui-ci est déjà connu des enfants, est souvent associé au jeu et au divertissement mais souvent trop peu à l'apprentissage. Pour réduire cette influence, nous pensons que plus les interactions seront abordables, naturelles et proches de manipulations que l'élève pourrait réellement accomplir, plus l'outil s'effacera par rapport au contenu.
- Des difficultés de coordination ou de manière plus générale tous les problèmes psychomoteurs qui peuvent entraîner des erreurs dans les manipulations d'objets dans l'espace.
- Même si le support est tactile, la restitution d'information reste une information planaire (2D) et demande donc une reconstitution mentale de la 3^{ème} dimension, ce qui peut être complexe pour des enfants de 10 ans.
- La difficulté d'interpréter des vues différentes d'un même objet représenté dans des sous-fenêtres différentes (Figure 11). C'est pourquoi, des solutions multi-fenêtrées comme celle proposée par Martinet *et al.* (2010) sont difficilement transférables dans un contexte d'apprentissage chez l'enfant. En plus, la taille de l'écran tactile restreint souvent les solutions dont l'interaction est plutôt basée sur des manipulations bi-manuelles.
- L'amalgame qui peut être fait entre l'objet étudié et l'interface de manipulation. Par exemple, dans l'approche de Cohé *et al.* (2011) la T-Box, qui semble être un outil efficace et intuitif pour manipuler des objets en trois dimensions, peut provoquer un conflit cognitif puisqu'un enfant distinguerait mal la différence entre un outil cube dédié à la manipulation et le cube qui est l'objet de l'étude.
- L'apprentissage de la géométrie dans l'espace impose des fonctionnalités que l'on ne retrouve que très rarement dans les solutions proposées comme par exemple la désignation d'axes de rotations spécifiques (autres que barycentriques), construction de solides à partir d'opérations booléennes (intersection objet plan).

Nous allons expliciter pourquoi, dans une problématique d'apprentissage, il est important de pouvoir apporter des solutions à ces différents problèmes et nous présenterons comment, dans les solutions existantes (surtout développées pour des terminaux classiques comme des PC), ces difficultés sont plus ou moins prises en compte.

3.1 Problématique entre objet 3D et représentations planaires

La manipulation, au sens tactile du terme, d'objets comme des cubes, des sphères, des cônes, est une des premières activités conscientes des jeunes enfants. Elle fait partie d'un processus de découverte et d'apprentissage obligatoire. En 2011 a eu lieu en France une évaluation nationale des élèves âgés entre 10 et 11 ans (fin de cycle primaire, début collège). Cette étude fait ressortir que 4 enfants sur 10 ne sont pas en mesure d'appréhender correctement une représentation spatiale d'un cube et sont incapables de décrire correctement un cube en terme de nombre de faces, d'arêtes quand la représentation de la scène est planaire. Le taux d'échec passe à 50% si l'objet étudié est un simple prisme. Cet échec s'explique par le fait qu'à cet âge, l'enfant n'a pas encore assimilé l'ensemble des concepts nécessaires à la résolution de problème.

La théorie du développement cognitif de Piaget (1947) décrit quatre stades :

- Le stade sensori-moteur de la naissance à 2 ans,
- Le stade préopératoire de 2 à 7 ans,
- Le stade concret et opérationnel de 7 à 11 ans,

- Le stade opérationnel formel à partir de 11 ans.

A partir de l'étude de dessins faits par des enfants, Piaget et Inhelder (1948) ont étudié le développement de la représentation spatiale. Là encore, ils catégorisent les résultats en 4 ensembles correspondant à des étapes clé : le sensori-espace, l'espace intuitif, l'espace concret et l'espace formel.

Il apparaît dans le développement précoce des notions spatiales que celles-ci sont liées de près à la perception et à la motricité, elles-mêmes fortement dépendantes de la maturité du système nerveux central.

Ils classent les dessins d'enfants en trois étapes différentes. Le premier est le stade d'incapacité synthétique à 3 et 4 ans lorsque les dessins ne sont pas conformes à la perception. La deuxième étape est le réalisme intellectuel 4-8 ans lorsque les enfants sont capables d'analyser l'espace par l'observation. Les relations spatiales commencent à être coordonnées et les relations projectives commencent tout juste à émerger. La dernière étape est le réalisme visuel entre 8 et 9 ans, quand les enfants commencent à utiliser la notion complexe de perspective. Cette théorie explique une partie des difficultés des enfants à faire des liens entre des formes en 3D et leur représentation 2D. La figure 10 montre un exemple classique de complexité d'interprétation chez les enfants de 8 à 9 ans. Pour tout adulte normal (même si la notion de normalité resterait à définir) l'image représentée ci-dessous est un cube. Notre habitude de la perspective et de la gestion de l'espace ne laisse que peu d'incertitude quant à la réponse donnée. Un enfant de 9 ans va découper cette figure en un ensemble de structures élémentaires simples parce qu'il est incapable de l'interpréter dans son ensemble. Là où vous voyez un cube, un enfant verra un carré et deux parallélogrammes.

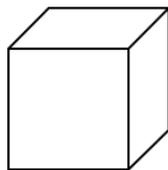


Figure 10. *Un cube ou un carré avec deux parallélogrammes ?*

Une fois que l'enfant commence à comprendre la notion de perspective dans son interprétation du monde, les problèmes ne disparaissent pas pour autant. Ils changent de natures et gagnent en complexité. Si la perception dans l'espace permet d'interpréter correctement les objets vus, il reste extrêmement complexe de reconstruire l'objet sous un point de vue différent.

Depuis les travaux de Piaget et sa théorie du développement de la représentation spatiale chez l'enfant, de nombreuses études ont été menées pour mieux comprendre cette problématique de reconstitution dans l'espace 3D, de formes présentées sur un support planaire.

Dolle (1986), Wittling *et al.* (1986) et Guillermain (1986), en accord avec les travaux de Piaget, ont affiné et complété cette théorie pour mettre en lumière les difficultés de représentation de l'espace 3D et se sont intéressés plus spécifiquement à la problématique de la représentation de la perspective (avec notion de point de fuite) qui reste le moyen le plus naturel chez l'enfant de représenter ce qu'il perçoit de son environnement.

Audibert et Keita (1987) mettent en exergue une partie de ces difficultés au travers d'une série de tests consistant à comprendre puis reproduire des formes plus ou moins complexes dessinées en perspective (Figure 11). La difficulté est double, elle est à la fois dans la capacité des enfants à comprendre la forme initiale et donc à reconstituer mentalement l'objet dans l'espace, mais aussi à retraduire au travers d'un dessin les mêmes objets (faces, arêtes) sous une perspective différente. Les auteurs insistent sur la nécessité d'apprendre donc d'enseigner cette technique de reconstitution d'une image 3D.

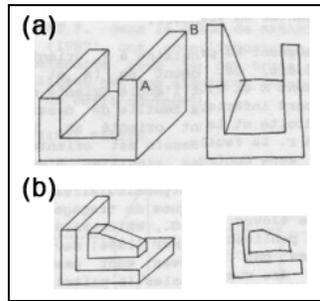


Figure 11. *Interprétation en vue de face par des enfants de deux images en perspective*

Bautier *et al.* (1987) met en évidence l'incohérence des représentations mentales des enfants. Il indique également l'importance d'utiliser le modèle des solides avec des enfants afin de construire des représentations correctes de l'espace.

Parzys (1988) et plus tard Colmez et Parzys (1991) vont expliquer la nature du conflit chez les enfants. Il réside dans la difficulté de lier ce qui est connu et ce qui est vu au cours de la réalisation ou de l'interprétation d'une représentation en perspective d'un solide. Ils mènent une vaste étude et analysent 1500 dessins de plus de 1200 élèves de 8 à 17 ans. De l'analyse des dessins et de leur catégorisation, ils identifient trois étapes :

- entre 8 et 10 ans, les dessins en perspective sont basés sur ce qui se voit ;
- entre 10 et 15 ans, il y a un conflit dans les dessins entre ce qui est connu et ce qui est vu ;
- à partir de l'âge de 15 ans, les dessins en perspective sont basés sur ce qui est connu.

Pour résoudre un conflit mental entre des formes en 3D et leurs représentations en 2D, Audibert et Bonafé (1986) recommandent explicitement l'utilisation de modèles de solide ou d'utiliser des constructions que les enfants auront eux-mêmes réalisées. Ils soulignent l'importance des manipulations qui permettent de montrer la contradiction entre les formes 3D et leur représentation 2D.

3.2 Apport de la technologie dans la liaison entre formes 3D et leurs représentations planaires

Il ressort de toutes les études sur la perception de la 3D chez les enfants que les deux choses fondamentales dans le processus de compréhension sont la construction du modèle et sa manipulation. Ces deux activités sont relativement simples à mettre en œuvre dans les prémisses de l'apprentissage, à savoir quand les enfants commencent à faire le lien entre ce qui est perçu et sa représentation. Cette affirmation n'est exacte que si l'objet manipulé est unique. Quand les enfants doivent par exemple comparer plusieurs solides dans l'espace, la difficulté provient

de leur incapacité à mentalement construire un modèle différent pour chaque objet sans une certaine forme de confusion dans les données perçues. Un autre problème important est souvent l'incapacité de construire simplement un modèle réel manipulable pour qu'ils puissent vérifier les représentations mentales qu'ils avaient de la forme.

C'est à ce moment que les nouvelles technologies peuvent apporter des outils efficaces pour aider à faire le lien entre l'espace réel et sa projection dans un espace à 2 dimensions. Elles permettent d'apporter des possibilités de manipulation là où les représentations planaires ne permettaient qu'une observation et une interprétation.

En accord avec les travaux d'Osta (1987), nous pensons que les nouvelles technologies apportent une dimension nouvelle au contexte particulier de l'apprentissage et plus spécifiquement à tout ce qui est lié à une interprétation de données issues de la perception. Nous admettons comme postulat que les enfants sont, dans leur très grande majorité, capables de manipuler la représentation dynamique d'un objet. *De facto*, cette représentation de l'objet, souvent un dessin, devient l'élément central du problème car ce n'est qu'à travers elle qu'un enfant pourra percevoir l'information, reconstruire un modèle et extrapoler des représentations différentes de celui-ci.

Dans ce contexte d'apprentissage de la géométrie dans l'espace et au vu des difficultés que représentent la conceptualisation et la représentation en 3D, il semble fondamental que les outils proposés ne surchargent pas cognitivement le travail des enfants. Pour cela, nous pensons qu'il est important de ne pas reprendre des métaphores qui ne seraient pas adaptées à l'apprentissage. Par exemple, dans le cadre de l'utilisation de surfaces tactiles, l'objectif est de minimiser l'écart entre l'observation, la manipulation d'un objet réel et les mêmes actions réalisées avec un avatar de cet objet.

4 Notre application Fingers

4.1 Apprentissage de la géométrie dans l'espace

Avec comme objectif principal une problématique d'apprentissage, il semblait fondamental que le public visé, à savoir des enfants de 9 à 11 ans, se focalise sur le contenu plus que sur le support ou encore l'interaction. Nous avons donc pris l'option de simplifier le mode opératoire et de privilégier la cohérence d'interaction au sein d'une même catégorie de fonctions. Nous avons choisi d'explorer l'ensemble des fonctionnalités offertes par les tablettes et d'abandonner les modes d'interaction conventionnels comme les menus. Nous avons défini une catégorisation des interactions spécifique à notre étude. Les contraintes que nous nous sommes fixées étaient essentiellement dépendantes de critères comme l'intuitivité, la cohérence, la facilité d'apprentissage ou encore la facilité d'exécution pour le public visé.

Comment catégoriser les interactions ? Nous avons pris l'ensemble des actions liées à l'apprentissage et nous les avons classées de deux manières différentes. La première est en fonction des tâches à réaliser. Cette catégorie est basée sur les tâches que l'utilisateur veut faire (Figure 12). La seconde est fonction des interactions nécessaires pour réaliser une tâche. Cette catégorie est basée sur la séquence des interactions effectuées par l'utilisateur pour exécuter une tâche (Figure 13), cette catégorie est basée sur l'action.

Organisation des catégories basées sur les tâches

Après avoir observé les besoins pédagogiques et les différentes applications (Cabri 3D, Calques 3D, ...), nous regroupons toutes les fonctions dans 9 catégories en fonction des tâches à réaliser. La figure 12 présente le premier niveau de cette catégorisation.

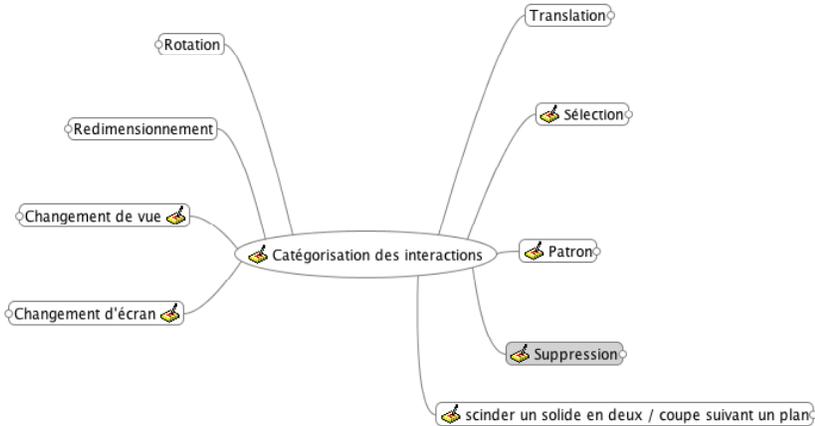


Figure 12. Catégorisation de niveau 1 basée sur les tâches à réaliser

Chacune de ces catégories peut comporter un ensemble plus ou moins important de sous catégories (niveau 2, 3, etc). Par exemple, la rotation peut se subdiviser en rotation autour du barycentre, d'un axe du repère de l'objet ou encore d'un axe construit à partir de points spécifiques. Elle peut s'appliquer à un objet, la position de l'observateur ou encore le point visé. Les interactions associées à certaines catégories peuvent être définies par des notions d'affordance ou d'habitude. Nous pouvons par exemple comprendre que le changement d'échelle peut être systématiquement associé au pincement pouce index donc plus généralement à l'écart de deux points de contact.

Catégorisation basée sur les interactions

Cette catégorisation reprend les mêmes fonctionnalités mais en les réorganisant par modalité tactile (Figure 13).

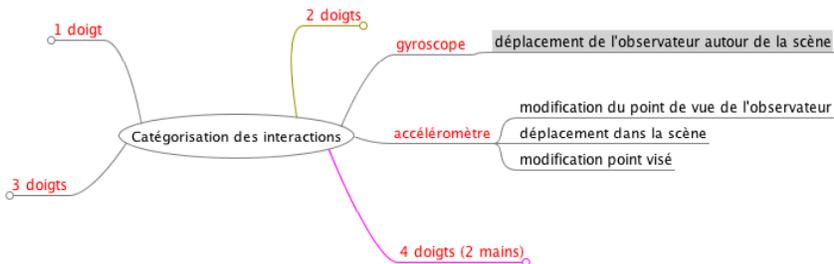


Figure 13. Catégorisation de niveau 1 basée sur les types d'interaction

La définition et le maintien de ces deux catégorisations facilitent l'intégration de nouvelles fonctionnalités en permettant une simplification des vérifications et la garantie d'une cohérence dans les interactions créées. Notre modèle permet une vérification soit par le nombre de points de contact soit par la fonctionnalité à construire (Figure 14).

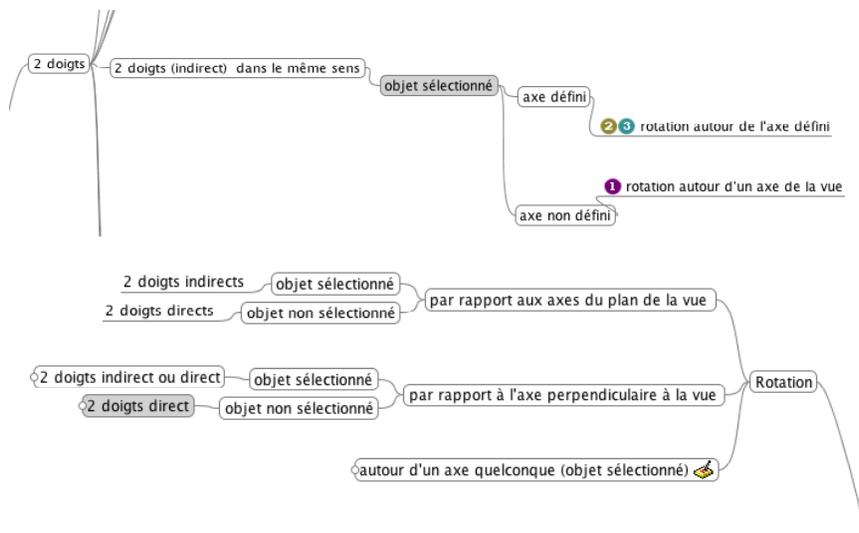


Figure 14. Développement de deux mêmes actions de rotation présentées selon les deux catégorisations

4.2 Gestion des rotations

Les fonctionnalités de notre application FINGERS® (Find INteraction for Geometry learnERS) sont aujourd'hui à trois stades de développement :

- La première catégorie concerne les fonctionnalités que nous avons implémentées et validées par des tests utilisateur. Cette catégorie contient les manipulations basiques des objets, à savoir la translation dans le plan et dans l'espace ainsi que les fonctionnalités de rotation (barycentriques, axiale et suivant un axe construit, observateur), la manipulation de patrons.
- La deuxième catégorie contient les fonctionnalités développées mais non évaluées comme la duplication d'objets, la sélection paramétrée, la suppression et la gestion des couleurs.
- Enfin une dernière catégorie concerne les fonctionnalités de transformations topologiques ainsi que celles de communication entre terminaux dans le cadre d'un travail collaboratif.

La fonctionnalité Rotations

On apprend dans les écoles primaires et les premières années de collège qu'en mathématiques, une rotation d'un objet dans l'espace est définie par un axe de rotation et un angle. Dans un processus d'apprentissage, nous ne pouvons limiter la définition de la construction d'une rotation à un axe du système alors que naturellement les enfants font pivoter des objets suivant des axes passant par une arête ou deux sommets d'une diagonale.

Lorsque l'on veut effectuer une rotation d'un objet, il est important que l'utilisateur ait la possibilité d'identifier clairement certains paramètres comme l'axe

ou un centre de rotation. Ceci est important afin d'éviter que les enfants ne pensent qu'une rotation ne s'effectue qu'autour d'un point donné de l'espace. La seconde consiste à prévoir la possibilité de construire une rotation autour d'un axe quelconque et non seulement autour d'un axe passant par le centre de gravité ou un vecteur du repère de l'objet.

Il y a deux principaux avantages à cette dernière contrainte. Cela permet tout d'abord une représentation de la rotation aussi proche que possible de la définition mathématique. Enfin, ceci élargit les possibilités d'interactions pour s'approcher des interactions que pourraient effectuer un enfant avec un solide réel. Cette approche est vraiment nouvelle. Elle se différencie des applications que nous avons pu tester qui ne construisent les rotations que comme une combinaison d'une rotation autour d'un axe passant par le centre de gravité associée à des translations. Par ailleurs, elles ne permettent parfois même pas aux enfants de choisir un sens à la rotation. Nous allons présenter comment cette problématique de rotation était ou est encore traitée dans les trois logiciels principaux dédiés à l'apprentissage de la géométrie dans l'espace en France.

Pour aider les élèves dans l'apprentissage de la géométrie 3D, un grand nombre de produits logiciels de géométrie 3D existent ou ont existé, citons par exemple Calque3D ©, Geospace © ou Cabri 3D ©.

Les logiciels dédiés à l'apprentissage de la géométrie dans l'espace sont généralement très différents des logiciels dédiés par exemple à la création d'images de synthèse comme Blender© ou encore des logiciels de CAO. La finalité est différente et les fonctionnalités sont spécifiques. Une fonctionnalité spécifique aux logiciels d'apprentissage est par exemple le patron d'un solide alors que l'affichage réaliste (lumière, état de surface, ombres portées etc) ne représente pas une priorité.

Aujourd'hui, il existe peu voire pas de logiciel d'enseignement de la géométrie développé pour exploiter au mieux les possibilités offertes par les tablettes tactiles multi-touch. Tous les logiciels dédiés qui ont été utilisés ces dernières années dans les écoles ont été développés pour fonctionner sur des ordinateurs avec des interfaces conventionnelles généralement de type clavier/souris. Ces dispositifs d'entrée limitent *de facto* le naturel des interactions. Chaque logiciel a donc construit une grammaire d'interaction qui prenait en compte les limites techniques des interfaces conventionnelles.

L'analyse des trois principaux logiciels utilisés (Calque3D ©, Geospace © et Cabri 3D ©) montre qu'il existe deux grandes catégories, deux approches différentes pour gérer les rotations.

La première approche, utilisée dans Geospace, permet de construire des rotations autour de 3 axes d'un système de référence invisible qui n'est pas un système au sens mathématique du terme (Figure 15).

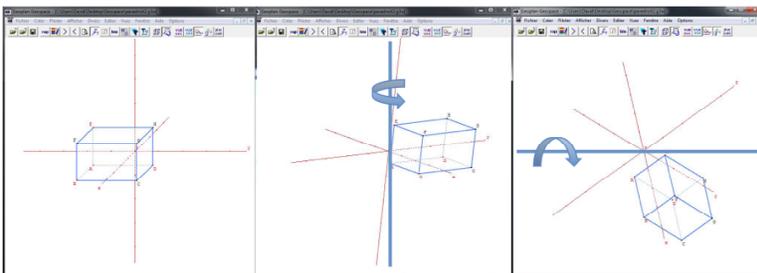


Figure 15. Différentes rotations avec Geospace, nous avons rajouté les axes bleus pour visualiser les rotations

L'utilisateur oriente la totalité de la scène en utilisant la souris, mais il est compliqué voire impossible de faire pivoter un objet autour d'un des axes du système représenté avec cette même souris ou une touche clavier. De plus, les rotations sont souvent assimilables à des téléportations d'une position de départ vers une position d'arrivée, ce qui ne facilite pas des orientations précises. Nous entendons par téléportation le fait qu'entre deux positions, la progression du déplacement n'est pas continue et plutôt binaire.

La deuxième approche utilisée par Calque 3D et Cabri 3D est aussi inattendue que la première. Ici, nous sommes seulement autorisés à faire des rotations autour de deux axes. La seule différence entre ces deux produits logiciels est que Calque 3D utilise deux curseurs et Cabri 3D utilise un clic droit et le mouvement de la souris pour effectuer les deux rotations autorisées. Les deux logiciels utilisent comme premier axe de rotation l'axe Y du système de référence représenté sur l'écran (Figure 16), mais le second axe de rotation est statique et n'appartient pas au système de référence mathématique.

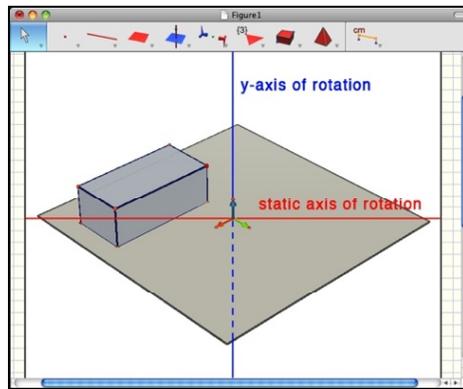


Figure 16. *Management des axes de rotations avec Cabri 3D. En bleu le premier axe de rotation Y et en rouge un axe statique non référencé*

Pour résumer les fonctionnalités disponibles sur les différents systèmes utilisés dans les écoles, nous pouvons dresser un tableau récapitulatif. Nous constatons qu'aucun des trois logiciels ne permet d'effectuer l'ensemble des actions que devrait posséder un logiciel d'apprentissage.

Notre approche pour la gestion des rotations

Notre application FINGERS[®] est développée sur des terminaux tactiles et plus particulièrement sur une technologie Apple[®], tout simplement parce que cette société a développé de nombreux partenariats avec les écoles primaires et collèges ces dernières années. Ce choix a introduit deux contraintes majeures liées à ces terminaux. La première et non des moindres, est la surface d'interaction qui est de moins de 10 pouces et la tendance n'est pas actuellement au développement de tablettes de plus grande dimension, bien au contraire. Cette contrainte va être limitative en termes de densité informationnelle utilisable, en termes de précision de sélection, d'occultation d'information et d'exécution de tâches. La seconde est liée à la manipulation même de la tablette et à sa relative fragilité. Certaines fonctionnalités techniques comme le gyroscope nécessitent des mouvements et déplacements réels de l'utilisateur, ce qui peut accentuer les possibilités de détérioration.

	Geospace	Cabri 3D	Calque 3D
Rotation de la scène autour des 3 axes du référentiel scène	X		
Rotation de la scène autour des 2 axes du référentiel scène	X	X	X
Rotation par téléportation d'un solide autour de 3 axes	X	X	
Rotation dynamique d'un objet par interaction directe			
Rotation dynamique d'un solide par interaction indirecte			
Rotation suivant un axe non prédéfini			

Tableau 1. Fonctionnalités identifiées dans les logiciels d'apprentissage de la géométrie dans l'espace

Si une désignation doit par définition être directe (appui sur l'objet à manipuler), une rotation doit pouvoir être faite aussi de manière indirecte (l'utilisateur ne touche pas directement l'objet) afin d'éviter l'occultation de la zone d'action par tout ou partie de la main. Nous travaillons dans plusieurs systèmes référentiels différents. Le premier est celui du cadre qui délimitera les axes de plan (X et Y) et qui servira de plan de projection pour les rotations liées à la modification du point de visée de l'observateur. Le second est le référentiel de la scène centré sur un point origine (0,0,0) du monde. Ce référentiel permet de manipuler la scène dans son ensemble. Enfin un dernier référentiel, lié à l'objet sera associé au barycentre du solide (Figure 17).

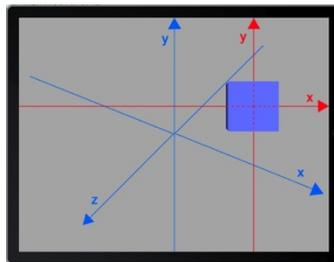


Figure 17. Référence de l'objet en rouge et référence de la scène en bleu

Les objets que nous manipulons sont ceux classiquement utilisés par les enseignants lors de manipulations conventionnelles. Nous pouvons intégrer à nos scènes des solides de type cube, cônes, sphères, pyramides et prismes. L'ajout d'objet se fait par dépôt d'un avatar tangible sur la surface de l'écran.



Figure 18. Un avatar tangible est utilisé pour ajouter un objet dans la scène

Pour être manipulé, un objet doit préalablement être sélectionné. Pour ce faire, l'utilisateur devra effectuer un « touch » long directement sur l'objet désiré. Une fois sélectionné, l'objet, identifié par l'affichage du référentiel, peut être manipulé dans l'espace suivant les 3 dimensions aussi bien en translation (voir chapitre suivant) qu'en rotation. On affiche le référentiel du solide (Figure 19 a) ainsi que les sommets sélectionnables matérialisés par des petites sphères de couleur rouge (Figure 19 b).

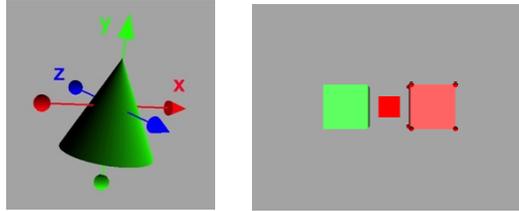


Figure 19. a) Affichage du référentiel de l'objet b) Affichage de sommets

Si aucun axe de rotation n'est sélectionné, l'objet pivote autour de son barycentre (Figure 20). L'utilisateur fera glisser deux points de contact sur l'écran, déplacement qui sera traduit en variations X et Y, valeurs qui sont ensuite injectées dans la matrice de rotation de l'objet.

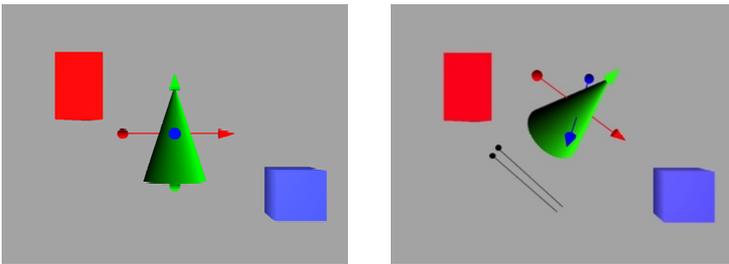


Figure 20. Rotation autour du barycentre du solide

Si l'on désire effectuer une rotation autour d'un des axes spécifiques de l'objet, il suffit de le désigner. Automatiquement les deux autres axes deviendront translucides afin de ne pas apporter de confusion quant à l'action réalisée (Figure 21). La rotation sera possible uniquement autour de l'axe sélectionné. On pourra à tout moment changer d'axe de rotation en sélectionnant un autre axe ou revenir à une rotation barycentrique en effectuant un « touch » sur l'axe déjà sélectionné.

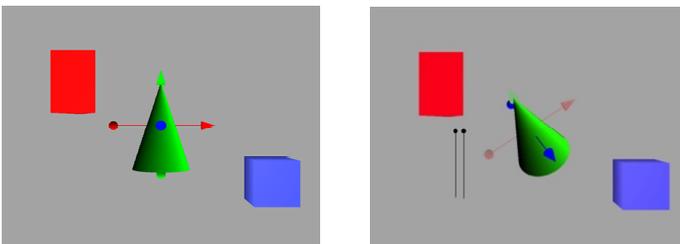


Figure 21. Sélection d'un axe de rotation Z en bleu

Notre système de rotation ne se limite pas uniquement au barycentre du solide ou à son référentiel orthonormé. Il peut être utile parfois de définir un axe de rotation porté par l'objet. On peut par exemple vouloir effectuer des rotations suivant une arête déjà construite, un axe fictif passant par exemple par la diagonale d'une face ou celle d'un solide (Figure 22). L'utilisateur devra désigner les deux sommets par lesquels il veut faire passer son axe de rotation. Un retour visuel par changement de couleurs indiquera les sommets sélectionnés (passage à la couleur verte). Comme pour les axes du repère du solide, il pourra modifier ses choix simplement en sélectionnant un sommet actif qui reprendra sa couleur initiale (ici rouge). Les interactions pour faire pivoter l'objet sont les mêmes que pour une rotation barycentrique ou liée au repère de l'objet.

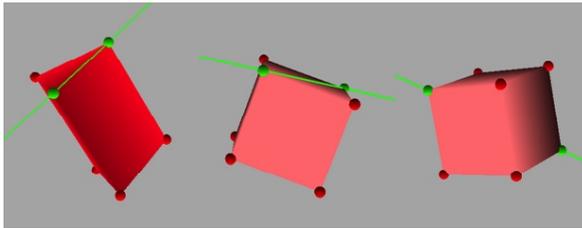


Figure 22. Définition d'axes de rotation passant par des sommets

Pendant les apprentissages réalisés en classe, et d'autant plus pour la géométrie dans l'espace, les élèves peuvent, voire sont invités, à se déplacer pour changer leur point de vue sur une scène composée d'objets réels (cube en bois, Polydrons magnétiques, etc). Il était donc important que notre application puisse apporter aux élèves les mêmes possibilités d'interactions. Il fallait qu'un élève puisse simuler un changement du point visé (rotation autour de la position de l'observateur) ou de simuler des rotations en gardant le même point visé (cela revient à tourner autour de la scène). Ces deux tâches sont dévolues à la fonction gyroskopique disponible sur les tablettes iPad.

L'utilisateur accède et ressort du contexte de gestion de l'observateur par un « touch » long sur chacun de bords de l'écran tactile (Figure 23 a). On indique à l'utilisateur le passage en mode « gestion de l'observateur » par une modification de la couleur de fond d'écran (Figure 23 b).

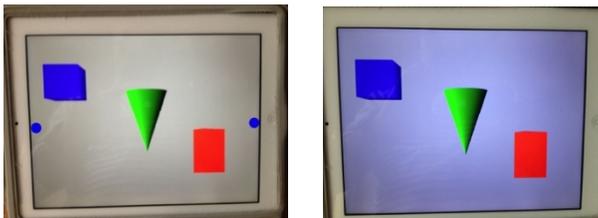


Figure 23. a) Passage en mode gyroskopique par un « touch » long sur chaque bord, b) Retour visuel pour confirmer le contexte de gestion de l'observateur

Une fois que l'utilisateur se trouve dans le mode gyroskopique, il peut par un simple « touch » sur un des bords passer d'un état de modification du point visé à un état de modification de la position de l'observateur. En fait, nous utilisons ici la

métaphore de la caméra. La tablette se comporte comme une fenêtre d'observation, l'utilisateur pourra l'orienter pour choisir simplement son point de vue (Figure 24).

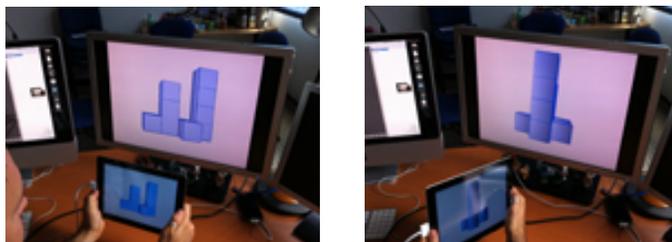


Figure 24. Gyroscopie et métaphore de la caméra pour modifier le point de vue ou le point visé

Le tableau 2 reprend le comparatif fonctionnel, pour la gestion des rotations, des principaux outils utilisés dans les écoles primaires et inclut les fonctionnalités de notre application.

	Geospace	Cabri 3D	Calque 3D	Notre application
Rotation de la scène autour des 3 axes du référentiel scène	X			X
Rotation de la scène autour des 2 axes du référentiel scène	X	X	X	X
Rotation par téléportation d'un solide autour de 3 axes	X	X		
Rotation dynamique d'un objet par interaction directe				X
Rotation dynamique d'un solide par interaction indirecte				X
Rotation suivant un axe non prédéfini				X
Rotation du point visé				X
Rotation de l'observateur				X

Tableau 2. Fonctionnalités identifiées dans les logiciels d'apprentissage de la géométrie dans l'espace

4.3 Gestion des translations

Tour d'horizon des solutions existantes

Il est relativement aisé de construire une interaction pour déplacer un objet dans un espace ne comportant que deux dimensions. Utiliser une souris ou un doigt pour positionner un objet dans un plan semble être quelque chose de naturel et les utilisateurs convergent vers une même grammaire, un même type d'interaction que l'on pourrait résumer à un contact direct sur l'objet pour le sélectionner, maintien du contact puis glissement du doigt (ou de la souris) pour déplacer l'objet. On retrouve le même type de consensus pour certaines rotations, principalement celles qui correspondent à une rotation d'un objet autour de l'axe Z d'un repère orthonormé (faire pivoter une photo par exemple). Dit autrement, tout le monde

s'accorde sur le fait que faire pivoter une image sur un espace plan, s'effectue avec un pouce et un index simulant une rotation. Dès que l'on aborde la problématique de déplacement dans l'espace, cette belle unanimité concernant le geste efficace et affordant à réaliser n'existe plus.

Développer une grammaire de gestes spécifiques pour pouvoir gérer des interactions de type 3 DOF impose de prendre en compte de nombreuses contraintes supplémentaires. Interagir, construire, manipuler des objets dans un espace en 3 dimensions avec des interfaces en 2 voire 1 dimension est un des problèmes majeurs depuis la création des premiers mondes virtuels. De nombreux logiciels dédiés par exemple à la CAO ou à l'animation ont développé des interfaces d'entrée en 3D (Phantom©, spaceball, souris3D, etc) sans réussir à converger vers un outil unique efficace et efficient. En 1986, Nielson et Olsen (1986) définissent une technique appelée Triad Mouse permettant la spécification de points 3D par la projection d'un mouvement de souris sur une cartographie des axes principaux d'un objet (Figure 25).

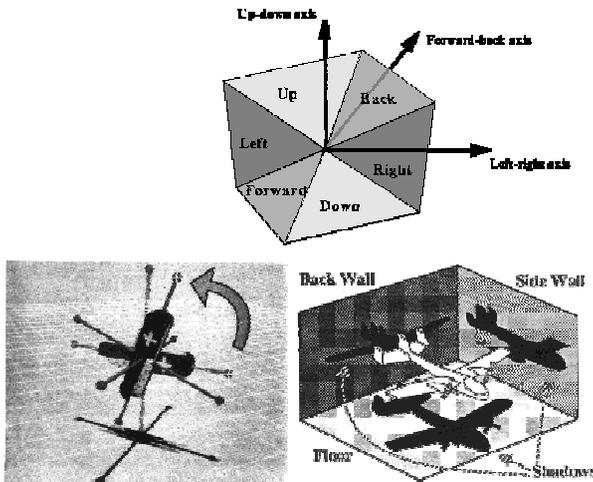


Figure 25. Zones de mouvements du curseur pour la technique de Triad Mouse

Les widgets 3D sont à nouveau proposés et associés à des objets de la scène. Ces outils sont ajoutés *a posteriori* à la modélisation de l'objet sous la forme d'ancres (ou poignées) pour gérer des rotations ou existent sous la forme d'ombres portées pour permettre d'appréhender la notion de profondeur, hauteur et largeur lors de translations.

En 1988, Chen *et al.* (1988) s'est intéressé aux méthodes de rotation en 3D. Il a démontré que l'utilisation d'un dispositif spécifique, comme un trackball, est plus facile à utiliser et plus efficace qu'une souris 2D, et ce pour toutes les manipulations y compris les translations.

Depuis 2008 et la généralisation des écrans tactiles multi-touch (GPS, SmartPhone, ordinateurs portables, etc), utiliser une combinaison de doigts pour réaliser des actions nous semble naturel, en tout cas permet d'envisager de nouveaux modes d'interaction. Si lancer une application, faire défiler un album photos ou encore désigner des zones spécifiques se conçoit parfaitement, comment utiliser des contacts tactiles pour positionner, déplacer des solides dans l'espace ?

Le paradigme de l'action est essentiel dans la composition et l'appropriation du geste. En 2004, Grossman *et al.* (2004) a proposé un modèle de grammaire de gestes bi-manuels et développés pour un appareil tactile volumique. Contrôler et interagir avec un monde virtuel ou réel est un problème holistique. Décomposer des actions à effectuer dans l'espace (6 degrés de liberté), y associer des combinaisons de contacts tactiles est somme toute un concept artificiel. Comme toute interaction non naturelle, celles dédiées à la gestion des 3 dimensions sont sans doute plus compliquées à assimiler pour un utilisateur tout venant. Ces gestes sont d'autant plus difficiles à effectuer qu'il est extrêmement compliqué de ne pas introduire du bruit dans l'action en cours. Nacenta *et al.* (2009) a montré qu'il était pratiquement impossible d'effectuer une interaction tactile sans introduire de mouvements parasites. Il montre comment sur une action de zoom (effectuée par un éloignement pouce/index) associée à un déplacement, les utilisateurs introduisent un mouvement involontaire de rotation. Le fait que ce soit le bras qui réalise la plus grande part de l'interaction impose de prendre en compte certaines limites biomécaniques qui influenceront sur les choix de construction des grammaires.

Notre approche pour la gestion des translations

L'idée principale est que les trois degrés de liberté peuvent être gérés par une interaction multi-touch à l'aide d'une seule main. Cette contrainte nous paraissait être la condition *sine qua non* au développement d'un logiciel d'apprentissage de la géométrie dans l'espace sur tablette. Nous avons essayé de simplifier le geste en gardant les contraintes initiales. Nous voulions construire une grammaire de gestes que les utilisateurs puissent facilement apprendre, retenir, donc intuitive. Nous avons repris l'action de pincement, geste normalement associé au zoom, pour gérer les déplacements dans l'espace. Même si Nacenta (2009) a décrit les limites de ce type de geste, ce choix reste sans doute le plus adapté pour différentes raisons. Il est simple à exécuter et à retenir. Enfin il est un des gestes les plus abordant des interactions tactiles et dans le cadre du mouvement le long de l'axe Z, le retour visuel sur un objet peut être assimilé à un zoom. C'est le contexte d'interaction qui permettra de savoir si le « geste de zoom » modifie la position de l'observateur (avance/recule), s'il est utilisé pour modifier la taille d'un objet (*scale*) ou s'il est utilisé pour gérer la profondeur de déplacement de l'objet.

Le pincement est utilisé pour commander le mouvement le long de la direction de profondeur (Figure 26). Rapprocher les points de contact provoquera un déplacement suivant les Z négatifs (fond de l'écran), les écarter déplacera l'objet le long des Z positifs (vers l'observateur).

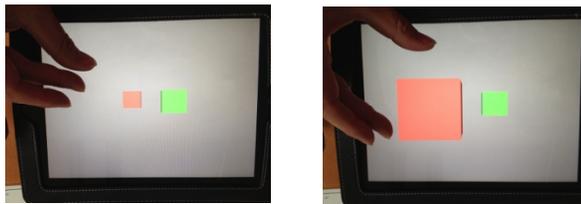


Figure 26. Pincement pour contrôler la profondeur

Pour déplacer l'objet dans le plan (X, Y de l'écran), il suffit de déplacer les deux points de contact simultanément (Figure 27).

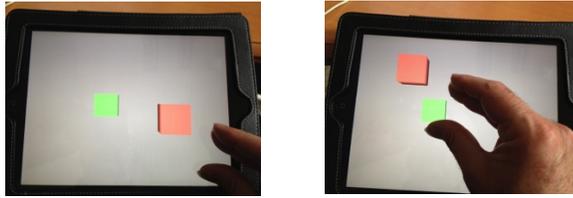


Figure 27. Déplacement des points de contact pour contrôler les mouvements dans le plan

Il est possible de combiner les deux interactions en un seul mouvement continu. Il devient très facile de contrôler, en un seul geste, les déplacements dans les trois dimensions simultanément (Figure 28).



Figure 28. 3 degrés de liberté gérés avec un seul geste

5 Tests utilisateur

Pour valider notre ensemble d'interactions, nous avons conçu un ensemble de tests écologiques. Le but de ces expériences est :

- De vérifier avec les élèves l'acceptation de notre approche et de vérifier s'il existe un réel apport pédagogique grâce à l'utilisation de terminaux tactiles.
- De construire des grammaires simples d'utilisation demandant un apprentissage ne dépassant pas quelques minutes.
- De construire des grammaires intuitives afin d'éviter les effets de réapprentissage entre deux séances séparées de plusieurs jours voire semaines.

5.1 Evaluation des rotations

Pour évaluer les avantages pédagogiques de notre approche, nous avons conçu un test de quatre exercices. Dans cette expérience, on a demandé aux utilisateurs de résoudre quatre problèmes de géométrie 3D. Le but de cette expérience est de vérifier s'il existe un bénéfice pédagogique dans l'utilisation d'une tablette tactile.

A : Participants

Nous avons recruté 22 élèves dont 10 garçons, âgés entre 10 et 15 ans (moyenne 11, SD 1.27). Les participants provenaient de deux écoles différentes. Nous avons obtenu l'autorisation rectoriale pour impliquer des élèves dans cette expérience. Pendant les tests, les élèves ont été divisés en trois groupes :

- Groupe papier (n = 8) il utilise uniquement des supports de papier.

- Groupe Tablette (n = 7) a travaillé avec un support papier puis avec une tablette. Deux élèves n'avaient jamais utilisé d' iPad avant. Quatre élèves avaient déjà utilisé une tablette et un participant avait sa propre tablette.
- Groupe Solide (n = 7) d'abord sur papier puis sur matériels pédagogiques type polydrons.

B : Le matériel

L'étude a été menée sur un terminal de type iPad 2. Notre application prototype FINGERS® avait été écrite en Objective-C et OpenGL ES. Nous avons utilisé des matériels pédagogiques (Figure 29) comme des cubes plastiques. Nous avons préparé deux séries de quatre problèmes à effectuer sur trois jours différents. Chaque problème a été choisi en accord avec l'enseignant pour son intérêt didactique. Durant tous les tests, chaque participant a été chronométré exercice par exercice. De plus, nous avons pris des notes détaillées, notamment sur les questions didactiques et les stratégies utilisées par les enfants pour résoudre les problèmes de géométrie 3D, avec ou sans outils. Les expériences ont été filmées.

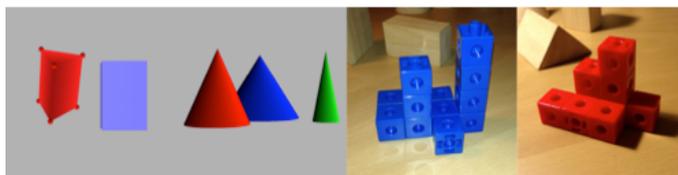


Figure 29. Les 4 exercices de notre test, 2 sont réalisés avec la tablette et deux avec des objets réels

C : Procédure

L'étude a été réalisée sur trois jours différents et sur deux semaines pour limiter l'effet mémoire.

On a donc demandé à chaque participant de résoudre des problèmes géométriques en trois sessions différentes :

- pré-test (séance 1) : tous les participants ont été invités à compléter quatre problèmes géométriques en utilisant une feuille de papier et un crayon. Un questionnaire post-tâche a recueilli les opinions au sujet de la facilité, la capacité à appréhender les vues 3D, l'intérêt et le plaisir de chaque exercice sur une échelle de Likert à 8 points où 7 signifie fortement en accord et 0 en désaccord. Nous avons corrigé le pré-test mais aucun résultat n'a été communiqué aux élèves.
- Test (séance 2) : les participants ont été répartis en trois groupes: le groupe papier (PG, n = 8), groupe Tablette (TG, n = 7), et le groupe Solides (SG, n = 7). Les trois groupes effectuent le même test que ceux sur papier lors de la première session (Figure 30). Le groupe 1 retravaillait uniquement sur feuille comme lors de la première session, le groupe 2 est passé sur tablette avec notre prototype (Figure 29) et le groupe 3 a manipulé uniquement des objets physiques (Figure 29).
- post-test (session 3) : Nous avons demandé aux élèves de corriger si besoin les exercices qu'ils venaient de faire lors du test. Les conditions ont été les mêmes que durant le test. Un questionnaire, identique à celui rempli après le pré-test, a ensuite été distribué et complété par les élèves. Enfin, nous avons réalisé des entretiens post-expérimentaux.

Pour créer des groupes, nous avons pris en compte : les résultats du pré-test (typologies d'erreur), l'école d'origine et l'âge. Les analyses statistiques n'ont pas

révélé de différences significatives entre les résultats des groupes dans le pré-test. Nous avons corrigé le test, mais aucun résultat n'a été communiqué aux élèves.

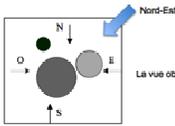
Exercice 1 :

Complétez le tableau, en indiquant pour chaque solide, le nombre de faces, le nombre d'arêtes et le nombre de sommets.

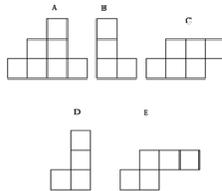
	Parallélépipède	Prisme
Nombre de faces		
Nombre d'arêtes		
Nombre de sommets		

Exercice 2 :

Trois cônes de hauteur identique sont disposés sur une table selon la vue de dessus suivante :

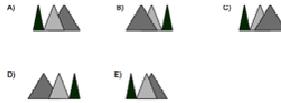


La vue obtenue du nord-est est la suivante :



- Réponses :
- Vue du dessus :
 - Vue de face :
 - Vue de droite :

Entoure la vue de l'ouest :



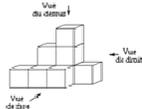
Exercice 3 :

On a empilé et collé des cubes de même arête pour obtenir le solide représenté ci-contre. On a peint toutes les faces visibles du solide obtenu, dessous compris.

- Combien de faces ont été peintes ?
- A. : 19
 - B. : 42
 - C. : 60
 - D. : on ne peut pas savoir.



Exercice 4 :



Parmi les cinq représentations ci-dessous, lesquelles correspondent à une vue du dessus, une vue de face ou une vue de droite indiquées sur la vue en perspective (clic-voix) d'un assemblage donné de neuf cubes ?

Figure 30. Seconde série d'exercices donnée aux élèves pendant les tests

D : Résultats

La figure 31 montre le taux de réussite pour le pré-test, le test et le post-test. Les analyses statistiques (K_{hi}-2) n'ont pas révélé de différences significatives entre les groupes dans le pré-test ($c^2 = 2,4107$, $df = 2$, $p = 0,2996$). En revanche, les analyses statistiques ont révélé que seul le groupe Tablette avait une différence significative dans les résultats entre le pré-test et post-test. Le groupe Papier a presque un taux de réussite constant ($c^2 = 0$, $df = 1$, $p = 1$). Le groupe Tablette augmente significativement son taux de succès ($c^2 = 4,6667$, $df = 1$, $p = 0,03075$). Le groupe Solides diminue son taux de succès ($c^2 = 0,6562$, $df = 1$, $p = 0,4179$). Les résultats du groupe Solides sont très surprenants. Les discussions avec les participants ont suggéré qu'il existe trois raisons principales. La première raison est que les élèves doivent créer un lien mental entre une scène 3D et sa représentation 2D. C'était un problème pour les quatre participants. La deuxième raison est que certains élèves n'ont pas l'habitude d'utiliser des solides pour résoudre des exercices. Par exemple, deux élèves ont manipulé la scène de l'exercice 2 au lieu de simplement se déplacer et tourner autour de la scène. Ainsi, après un certain temps, ils avaient perdu l'ensemble des repères nécessaires à la résolution du problème. La troisième raison est que les participants qui utilisaient les solides étaient plus confiants et six d'entre eux n'ont pas cherché à modifier leurs réponses pendant le post-test.

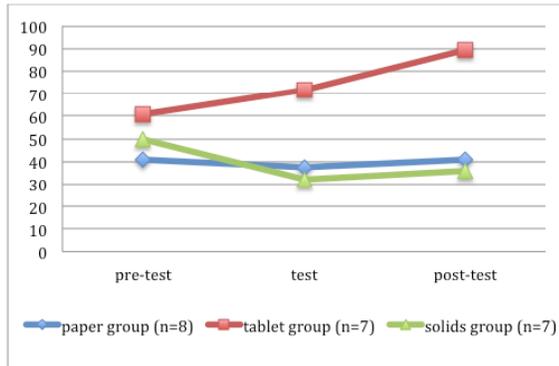


Figure 31. Taux de réussite en % pour chaque groupe et chaque séance

Le groupe Tablette (TG) et le groupe Solides (SG) ont utilisé les outils mis à disposition plus pour trouver des solutions aux problèmes et moins comme outil vérificateur (TG: 75%, SG: 57%). Mais le groupe Tablette a eu recours plus souvent aux outils spécifiques que le groupe Solides. Il ressort des entretiens post expérimentaux que le groupe Tablette émettait quelques réticences quant à l'utilisation du terminal tactile, non pas pour des raisons d'efficacité mais pour des raisons d'habitude d'utilisation. L'effort supplémentaire induit pour gérer la tablette venait s'ajouter à la problématique cognitive. Par contre, ils ont insisté sur le fait qu'ils étaient capables de faire pivoter ou tourner autour des solides avec beaucoup de facilité, un peu comme s'il était dans un monde réel.

La figure 32 montre que, dans trois exercices sur quatre, la sensation de pouvoir gérer simplement la 3D est plus importante avec notre prototype que pour le papier ou les solides.

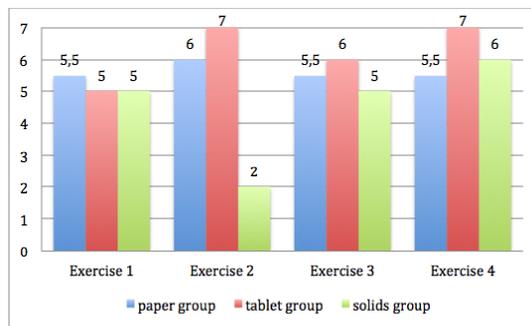


Figure 32. Les participants ont estimé utile l'utilisation des outils pendant le test et le post-test (médiane)

Nous avons observé que la typologie des erreurs a considérablement changé avec notre prototype, ce qui n'est pas le cas avec le papier ou les solides. Avec le groupe Tablette, 91% des erreurs étaient liées à la visualisation lors du pré-test et seulement 50% au cours du test.

L'augmentation significative des exercices résolus et la régression des erreurs lors de l'utilisation de notre prototype montrent qu'il existe un avantage pédagogique significatif dans la résolution des exercices de géométrie 3D.

Cependant, l'avantage pédagogique n'est pas le même pour tous les exercices. On constate que l'avantage pédagogique est fort pour les exercices 2 à 4 (montagnes de Piaget et différentes représentations), ce n'est pas le cas pour l'exercice 1 (trouver le nb de faces, arêtes, sommets).

Après le pré-test et après le test, nous avons demandé à chaque participant de nous donner leur opinion sur « l'outil » utilisé (Papier / Tablette / Solide) pour résoudre les problèmes géométriques. Leurs opinions ont été évaluées en indiquant leur degré d'accord ou de désaccord sur une échelle de Lickert en 7 points pour une série de déclarations (par exemple, « Je pense que cet outil est facile à utiliser »). Dans notre étude, les participants ont été invités à donner leur avis sur plusieurs dimensions : la facilité, l'intérêt, le plaisir et la facilité de perception de la 3D. Le retour d'expérience des utilisateurs montre qu'ils sont majoritairement favorables à la grammaire d'interaction proposée. Les interactions développées ont été majoritairement bien acceptées, elle ont été considérées comme simples d'utilisation et efficaces (tableau 3).

	Exercice 1	Exercice 1	Exercice 1	Exercice 1
Interactions adaptées	6 (2.5) ^a	7 (1.5)	7 (1)	7 (1)

^a. Médiane, valeur inter-quartile

Tableau 3. Retour utilisateur à propos des interactions (échelle de likert)

Quel que soit le groupe (Papier / Tablette / Solide), les analyses statistiques (ANOVAs) ont révélé une augmentation significative entre pré-test et post-test des opinions des participants sur plusieurs points : la facilité d'utilisation (respectivement 20,00 vs 22,23 ; $F(2-19) = 8,511$, $p = 0,008$), l'intérêt de l'exercice (respectivement 20,36 vs 21,89 ; $F(2-19) = 5,090$, $p = 0,036$), plaisir (respectivement 17,77 vs 20,46 ; $F(2-19) = 8,312$, $p = 0,010$) et la capacité d'interprétation de la scène dans l'espace (respectivement 17,99 vs 23,54 ; $F(2-19) = 31,94$, $p < 0,0001$). Les analyses n'ont révélé aucune différence significative entre les groupes (Papier / Tablette / Solide) et entre les interaction. En outre, aucun résultat significatif n'a été trouvé pour les opinions entre les différents exercices géométriques effectués dans notre test ($F(6-57) = 1,83$, $p = 0,108$). Pour expliquer cette absence de différence, les participants ont expliqué qu'un exercice mathématique est toujours un exercice mathématique avec ou sans tablette ou solide. Dit autrement, le support ne semble pas changer fondamentalement la perception de la matière par l'élève.

5.2 Evaluation des translations

Historiquement, les translations ont été les premières fonctions développées pour notre application. Nous avons construit cette seconde évaluation sur les translations dans l'espace avec trois objectifs :

- 1) comparer différentes alternatives pour connaître celle qui obtient le plus l'approbation des utilisateurs,
- 2) évaluer des performances de réussite,
- 3) savoir si les interactions proposées sont intuitives, donc simples d'utilisation.

A : Procédure

Nous avons partiellement répété l'expérience mise en œuvre par Martinet (2010). Nous avons testé deux techniques pour déplacer un cube suivant l'axe de profondeur. Le premier correspond à un déplacement le long des Z positifs (Figure

33 a) lorsque l'utilisateur effectue un mouvement d'écartement des points de contact, donc chez tous les participants du pouce et de l'index (nommé ensuite Z + ou Z), le second est le mouvement opposé à savoir le rapprochement des doigts (appelé après -Z ou Z-) (Figure 33 b).



Figure 33a. *Déplacement le long des Z positifs*

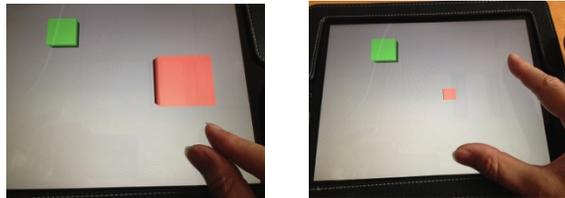


Figure 33b. *Déplacement le long des Z négatifs*

B : Participants

Lors des phases d'évaluation des translations, nous n'avions pas encore obtenu l'autorisation du rectorat pour mener des expériences dans les écoles. De plus, la notion de déplacement dans l'espace n'est pas une notion fondamentale dans l'apprentissage de la géométrie et les enseignants n'ont pas trouvé utile de tester ces fonctionnalités par rapport à leur objectif pédagogique. Nous voulions quand même valider un certain nombre de concepts et nous avons choisi un public cible différent pour valider notre approche. 16 participants (9 hommes et 7 femmes), âgés de 19 à 55 ans ont été recrutés (âge moyen 36,63). Tous les participants étaient des utilisateurs droitiers. 6 participants avaient une expérience avec des terminaux tactiles comme des tablettes ou des Smartphones, cette expérience étant évaluée en utilisant une échelle de Likert en 5 points, 1 (pas d'expérience) à 5 (utilise les éléments tactiles chaque jour). Deux participants utilisaient un terminal tactile tous les jours et une seule n'en utilisait pas (moyenne 3,31/5).

C : Procédure

Trois tâches ont été conçues pour mesurer l'efficacité et la robustesse de notre méthode d'interaction. Toutes les tâches sont subdivisées en 4 sous tâches identiques dans la finalité mais différentes dans l'action. Chaque essai consiste à superposer à un cube vert (cube cible) un cube rouge (cube libre). Les deux cubes sont de la même taille. Dans chaque essai, le cube cible et le cube libre occupent une position différente dans l'espace. Le chronomètre démarre lorsque l'utilisateur touche l'écran avec deux points de contact. Lorsque le cube rouge recouvre le cube vert, un message de félicitation apparaît à l'écran, le chronomètre s'arrête (Figure 34) et le participant effectue le test suivant. Le participant ne voit pas le chronomètre.

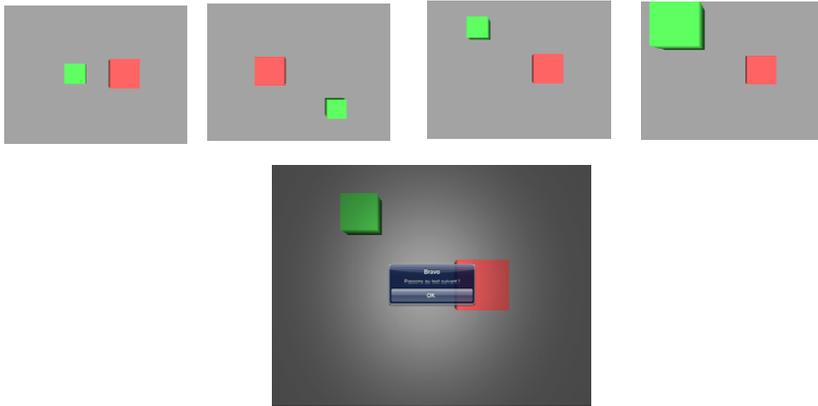


Figure 34. Test de translation dans l'espace et affichage du message de congratulation

Les participants doivent effectuer trois tâches :

- Tâche 1 : l'écartement des doigts déplace le cube en Z +, 4 exercices
- Tâche 2 : l'écartement des doigts déplace cube le en Z -, 4 exercices
- Tâche 3 : l'utilisateur recommence avec son geste favori, 4 exercices

Avant la séance de tests, une session d'entraînement de 10 minutes a été proposée à chaque participant (3 ne l'ont pas jugée nécessaire). Après cette session de prise en main, on a demandé aux participants d'effectuer les tâches 1 et 2. Nous avons recueilli les stratégies d'accomplissement de l'exercice, le nombre d'erreurs et le temps. Après la deuxième tâche, on a demandé aux participants de nous indiquer son interaction préférée en donnant des explications (verbalisation autour des raisons du choix). Ensuite, chaque participant exécute la tâche 3 avec son interaction préférée.

Les données recueillies ont été : (a) le temps pour remplir chaque tâche, (b) les avis au sujet de l'interaction (verbalisations) (c) les stratégies/erreurs. Les tâches et essais ont été contrebalancés (les participants ayant inversé les exercices 1 et 2 sont en rouge dans les tableaux). On relève le temps mis pour chaque tâche et à l'intérieur d'une tâche le temps mis pour chacun des 4 exercices. L'objectif était de connaître le geste plébiscité par les participants (effet affordance), de savoir si l'on pouvait espérer une diminution du temps de réalisation des exercices à l'intérieur d'une tâche (effet efficacité) et enfin de voir si la répétition d'une tâche pouvait améliorer les résultats (effet apprentissage).

D : Résultats

Tâche 1 : écartement Z+

Les résultats ont montré que tous les participants effectuent cette tâche facilement, sauf pour deux utilisateurs (N° 5 et 6) qui ont des difficultés pour effectuer le test 1 et l'utilisateur N° 11 pour effectuer le dernier test. Pour tous, les temps diminuent ou au pire sont stationnaires.

TEST IN SECONDS								
USER	AGE	SEXE	TACTILE LEVEL	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TOTAL
1	45	M	5	4,00	5,90	7,90	4,00	21,80
2	19	M	4	2,80	5,50	5,30	7,30	20,90
3	44	F	4	10,00	8,00	8,60	8,60	35,20
4	19	M	4	11,50	7,00	7,00	9,00	34,50
5	50	F	1	80,00	30,00	14,00	9,20	133,20
6	55	M	3	80,00	49,00	16,00	12,00	157,00
7	19	M	4	8,10	11,00	14,00	7,50	40,60
8	20	M	2	32,00	22,50	21,80	14,70	91,00
9	55	F	2	20,10	10,02	6,20	9,20	45,52
10	38	M	3	3,30	4,40	7,80	4,00	19,50
11	52	F	2	14,80	8,70	17,60	103,00	144,10
12	49	M	5	5,00	4,20	4,20	5,70	19,10
13	37	F	3	12,90	13,70	8,60	15,90	51,10
14	45	F	3	11,00	10,20	8,90	11,20	41,30
15	20	F	4	14,30	8,00	9,20	11,00	42,50
16	19	M	4	16,50	11,20	9,70	6,20	43,60
AVERAGE	36,63		3,31	20,39	13,08	10,43	14,91	59,82
σ	15,03		1,14	24,38	11,73	4,87	23,73	47,58

Tableau 4. Résultats des 4 exercices de la tâche 1

Tâche 2 : écartement Z-

Excepté pour l'un des participants (N° 5), le mouvement inverse n'est jamais l'interaction préférée. Elle semble moins naturelle par rapport au geste habituellement associé au zoom. Dans ce cas aussi, l'inclinaison de la courbe est positive. Le participant 6 a eu des difficultés pour réaliser l'exercice 2. Les participants 5 et 8 ont des résultats cycliques, 2 des 4 tests semblent être problématiques (mais ce n'est pas le même exercice pour les deux participants).

OPPOSITE TEST IN SECONDS								
USER	AGE	SEXE	TACTILE LEVEL	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TOTAL
1	45	M	5	3,90	3,90	5,40	4,40	17,60
2	19	M	4	2,80	5,50	5,30	7,30	20,90
3	44	F	4	7,00	7,90	8,00	7,20	30,10
4	19	M	4	13,00	8,25	9,50	9,90	40,65
5	50	F	1	14,90	38,60	6,20	42,00	101,70
6	55	M	3	14,00	82,00	17,00	3,04	116,04
7	19	M	4	11,20	12,50	13,50	12,00	49,20
8	20	M	2	44,10	12,80	23,60	19,00	99,50
9	55	F	2	24,00	11,20	19,00	7,50	61,70
10	38	M	3	4,70	6,10	7,90	8,10	26,80
11	52	F	2	16,00	7,00	9,20	5,80	38,00
12	49	M	5	5,40	5,00	4,70	5,20	20,30
13	37	F	3	14,8	21,6	14,9	18	69,3
14	45	F	3	9,6	7	7,5	25,7	49,8
15	20	F	4	16,30	9,00	11,20	9,50	46,00
16	19	M	4	18,00	21,00	11,00	9,70	59,70
AVERAGE	36,63		3,31	13,73	16,21	10,87	12,15	52,96
σ	15,03		1,14	9,99	19,63	5,43	9,97	30,45

Tableau 5. Résultats pour les 4 exercices de la tâche 2

Tâche 3 : écartement Z-

Un seul participant (N° 8) réalise l'exercice 1 avec un temps de plus de 25 secondes (alors qu'il avait mis 32 secondes pour réaliser le même exercice lors de la tâche 1). Pour tous les autres, les temps des tests sont proches, parfois avec de petites variations par exemple pour le participant N° 5 sur l'exercice 3.

TEST WITH FAVORITE INTERACTION								
USER	AGE	SEXE	TACTILE LEVEL	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	TOTAL
1	45	M	5	5,10	4,00	6,00	3,70	18,80
2	19	M	4	4,10	2,60	4,90	5,40	17,00
3	44	F	4	2,20	4,60	5,20	4,80	16,80
4	19	M	4	9,70	7,20	7,00	7,30	31,20
5	50	F	1	7,50	7,10	15,00	9,20	38,80
6	55	M	3	4,10	2,60	3,20	10,40	20,30
7	19	M	4	6,20	8,70	8,50	7,60	31,00
8	20	M	2	21,60	16,30	12,50	11,20	61,60
9	55	F	2	4,20	3,40	4,70	3,90	16,20
10	38	M	3	3,00	8,00	5,20	2,60	18,80
11	52	F	2	4,20	4,90	6,90	3,70	19,70
12	49	M	5	4,90	4,30	4,30	5,10	18,60
13	37	F	3	9,20	11,40	8,50	7,50	36,60
14	45	F	3	11,30	10,01	5,70	8,20	35,91
15	20	F	4	13,40	6,62	2,90	8,90	33,82
16	19	M	4	12,60	10,20	9,30	5,40	37,50
AVERAGE	36,63		3,31	7,71	7,12	6,86	6,56	28,25
σ	14,69		1,14	5,09	3,74	3,28	2,59	14,70

Tableau 6. Résultats pour les 4 exercices de la tâche 3

E : Gains

Le tableau suivant (Tableau 7) montre les bénéfices par utilisateur pour tous les tests. Les valeurs du tableau représentent le pourcentage de bénéfice (gains) calculé entre les temps mis pour les tests de la première tâche et ceux relevés pour la méthode préférée. Notons qu’une seule personne (n° 10) réalise un gain négatif. Si l’on regarde en détail les données, on constate que c’est le test N° 2 qui a posé problème (-81% alors que pour les 3 autres tests l’amélioration est sensible). L’utilisateur s’est rapidement approché du cube cible mais a oscillé longtemps avant d’atteindre le but final. Lors de l’entretien post expérimental, il a expliqué sa contre performance par une certaine forme de stress lié au désir de bien faire et à une moiteur des doigts qui empêchait l’exécution de gestes précis. Tous les autres participants ont amélioré les temps. Le gain de l'utilisateur n° 12 est faible parce que les temps enregistrés sur la première tâche étaient déjà très faibles. Le gain moyen est de 27,46% avec un écart type important dû essentiellement aux résultats médiocres du participant n° 10 et au faible gain possible de l'utilisateur 12.

BENEFIT IN %						
USER	TACTILE LEVEL	TEST 1	TEST 2	TEST 3	TEST 4	AVERAGE BENEFIT
1	5	-27,50	32,20	24,05	7,50	9,06
2	3	-46,43	52,73	7,55	26,03	9,97
3	3	78,00	42,50	39,53	44,19	51,06
4	4	15,65	-2,86	0,00	18,89	7,92
5	5	90,63	76,33	-7,14	0,00	39,95
6	3	94,88	94,69	80,00	13,33	70,73
7	4	23,46	20,91	39,29	-1,33	20,58
8	4	32,50	27,56	42,66	23,81	31,63
9	F	79,10	66,07	24,19	57,61	56,74
10	3	9,09	-81,82	33,33	35,00	-1,10
11	2	71,62	43,68	60,80	96,41	68,13
12	5	2,00	-2,38	-2,38	10,53	1,94
13	3	28,68	16,79	1,16	52,83	24,87
14	3	-2,73	1,86	35,96	26,79	15,47
15	4	6,29	-7,75	68,48	19,09	21,53
16	4	16,50	11,20	9,70	6,20	10,90
AVERAGE		29,48	24,48	28,57	27,30	27,46
σ		42,24	41,21	26,36	25,46	23,26

Tableau 7. Gains en % et bénéfice moyen par utilisateur

Un autre résultat important est le bénéfice réalisé entre la première et la troisième tâche (table 8). Si l'on considère le temps moyen, nous observons que pour tous les participants, l'avantage est positif. Cela nous laisse penser que le système est facile à utiliser. Même sans une période d'apprentissage, les utilisateurs améliorent sensiblement les résultats après seulement quelques manipulations.

BENEFIT FROM FIRST AND FAVORITE TASK			
USER	AVERAGE TIME T1	AVERAGE TIME FAVORITE	BENEFIT IN %
1	21,8	18,8	13,76
2	20,9	17	18,66
3	35,2	16,8	52,27
4	34,5	31,2	9,57
5	80,00	38,8	51,50
6	157	20,3	87,07
7	40,6	31	23,65
8	91	61,6	32,31
9	45,52	16,2	64,41
10	19,5	18,8	3,59
11	144,1	19,7	86,33
12	19,1	18,6	2,62
13	51,1	36,6	28,38
14	41,3	35,21	14,75
15	42,5	33,82	20,42
16	43,6	37,5	13,99
AVERAGE	55,48	28,25	32,70
σ	42,17	12,34	27,50

Tableau 8. Evolution entre travail réalisé dans les tâches 1 et 3

La figure 35 présente une évolution des variations de temps en moyenne pour chacun de 4 tests réalisés. On constate une diminution globale des temps pour les deux premiers passages avec cependant des croisements entre les méthodes (avec des écarts type parfois importants). Les temps du second passage, avec la méthode préférée, sont quant à eux bien en deçà des temps mis pour les deux premiers passages, la variation est pratiquement linéaire et décroissante avec des écarts type très faibles.

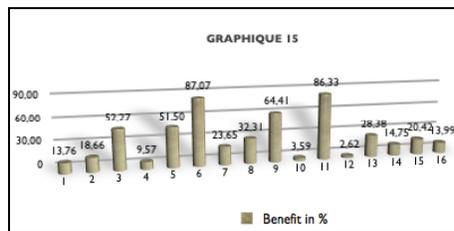


Figure 35. Bénéfice en% par participant entre la tâche 1 et la tâche favorite

Les utilisateurs confirment ces résultats au cours de l'interview réalisé après les expériences : « Le geste pour manipuler des objets est simple à comprendre et à réaliser », « Il était adapté pour effectuer une tâche avec une grande précision ».

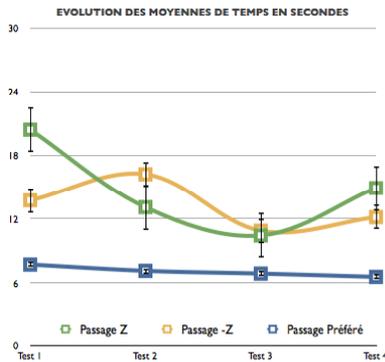


Figure 36. Evolution des moyennes pour les 4 tests

6 Conclusion et perspectives

6.1 Bilan sur l'étude

Les outils pédagogiques spécifiquement dédiés aux interfaces tactiles sont encore peu nombreux. Toutefois, l'essor des écrans tactiles et l'introduction de ces technologies dans le milieu scolaire (souvent par volonté politique) ouvrent des perspectives intéressantes dans le domaine de l'interaction dédiée. Dans cette étude, nous proposons de nouvelles interactions innovantes, pour définir et réaliser des rotations et des translations d'objets virtuels dans un contexte d'apprentissage de la géométrie dans l'espace. Nous avons formalisé une grammaire de gestes orientée apprentissage et nous avons proposé des bibliothèques de gestes et de fonctionnalités innovantes qui essaient d'intégrer les nouvelles spécificités proposées sur les tablettes numériques. Nous avons développé et testé deux grandes familles d'interactions à savoir la gestion des rotations et translation d'un objet dans un espace en trois dimensions. Nous avons comme objectif d'évaluer les apports de l'outil en tant qu'alternative ou complément à un enseignement plus conventionnel et une première partie de l'étude consiste à valider l'acceptabilité des concepts et de voir leurs impacts sur les apprentissages. Pour cela, nous avons construit deux expériences différentes. La première consistait à recueillir les impressions d'utilisateurs sur différentes options proposées pour gérer des translations et de voir l'efficacité et l'efficacité des solutions retenues. Une seconde étude a consisté à évaluer le gain de performances au travers d'exercices de compréhension en comparant trois méthodes de réalisation : Papier, Solide et Tablette. Les résultats obtenus en termes d'acceptabilité et de simplicité d'utilisation montrent que les tablettes tactiles, au delà du simple attrait technologique, peuvent être d'un réel apport pédagogique. Les tests comparatifs de trois méthodes de travail montrent que les résultats obtenus avec les tablettes, en terme cognitif, qualitatif et efficacité, sont très majoritairement supérieurs aux méthodes plus conventionnelles. L'outil s'est montré simple de prise en main, l'intuitivité des gestes a permis de minimiser à sa portion congrue les phases d'apprentissage et d'appropriation.

6.2 Perspectives

Les premiers résultats encourageants nous ont conforté sur l'intérêt des développements futurs. Nous avons intégré à notre application d'autres fonctionnalités qui sont en cours d'évaluation écologique. La première concerne la gestion des patrons d'objets. Un élève peut facilement déplier, manipuler et vérifier le patron d'un objet. La figure 37 nous montre les différentes étapes. Le passage en mode patron s'effectue avec 4 contacts s'éloignant deux à deux (un peu comme un double zoom). Les différentes faces de l'objet apparaissent dans des couleurs différentes. L'utilisateur peut déplacer indépendamment chaque face, puis avec un geste opposé à celui de l'ouverture vérifier la validité du patron créé.

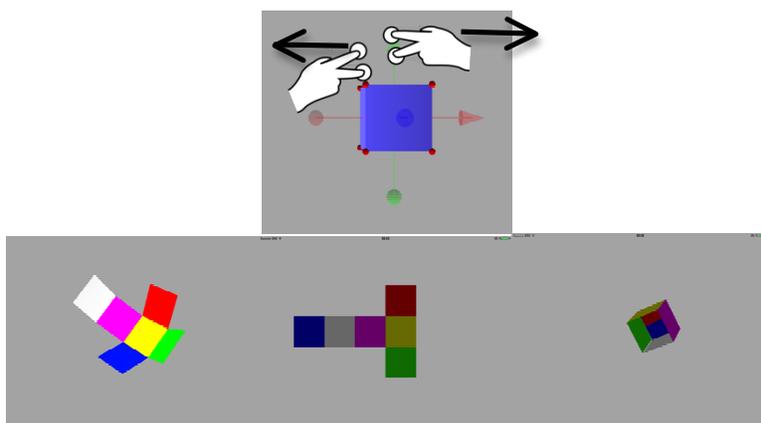


Figure 37. Exemples de manipulation de patron de cube avec un patron non valide sur l'image de droite

La fonctionnalité patron a été évaluée de manière écologique et les résultats sont actuellement en cours d'analyse.

Dans la plupart des applications mathématiques manipulant des objets, les possibilités de sélections d'objets sont généralement de deux types. Le premier est généralement destiné à la sélection d'un unique objet qui se traduit en terme de geste par un touch direct (sur l'objet). Le second concerne une sélection multiple et dans ce cas le geste du lasso est souvent l'interaction privilégiée. Peu d'outils, à notre connaissance, permettent par exemple de sélectionner tous les cubes ayant une couleur spécifique ou de sélectionner toutes les pyramides indépendamment de leur couleur ou encore de sélectionner tous les objets ayant une couleur donnée voire tous les objets constituant une scène de travail. Un objet est défini par un ensemble de paramètres comme par exemple sa topologie et sa couleur. Nous utilisons ces paramètres pour interpréter les intentions de l'utilisateur dans une phase de sélection. L'utilisateur commence par identifier un objet source avec un touch direct. En maintenant le touch source, l'utilisateur désigne un second objet avec un touch destination. Le système analyse, pour les deux objets identifiés, deux paramètres forme et couleur (exemple Figure 38, image de gauche où deux cubes rouges ont été désignés). Si les objets source et destination ont des paramètres forme et couleur identiques, le système sélectionnera dans la scène tous les autres objets possédant ces caractéristiques. Si les deux objets sélectionnés n'ont qu'un paramètre en commun (exemple Figure 38, image de droite où un cube rouge et un

jaune ont été désignés) le système sélectionnera tous les objets de la scène ayant la caractéristique commune à l'objet source et destination (un retour visuel est associé à l'action, les objets sélectionnés sont affichés avec une modification de la couleur de leurs arêtes).

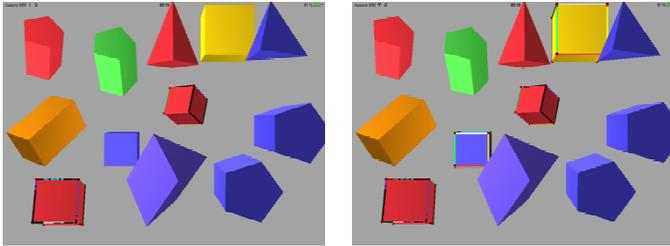


Figure 38. Exemples de sélections paramétrées de cubes

Si cette caractéristique commune est la couleur, le système sélectionnera tous les objets ayant la même couleur (Figure 39, image de gauche). Enfin si aucun des paramètres n'est commun, le système sélectionnera tous les objets de la scène. Si l'utilisateur veut retirer un objet de sa sélection, il lui suffit d'effectuer un clic court direct (Figure 39 image de droite).

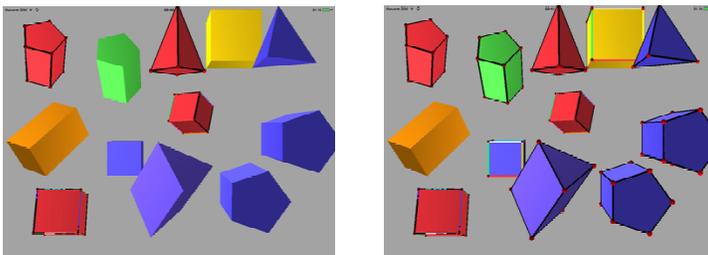


Figure 39. Exemples de sélections paramétrées d'objets

La fonctionnalité « sélection paramétrée » doit faire l'objet d'une évaluation écologique.

Enfin d'autres fonctionnalités sont en cours de développement comme par exemple la transformation des géométries par extrusion ou encore l'attribution d'une couleur à un objet. Cette dernière fonctionnalité, dans le cadre d'une application sans menu, impose de revoir l'adéquation entre un geste et une action qui initialement se prête mal voire pas à une résolution par interaction tactile.

Bibliographie

Audibert, G. & Bonafé, F. (1986). Apprentissage de la perspective cavalière. In Rabardel, P. & Weill-Fassina, A. *Le dessin technique. Apprentissage, utilisations, évolutions*. Hermès, 139-147.

Audibert, G. & Keita, B. (1987). La perspective cavalière et la représentation de l'espace. In Vergnaud, G., Brousseau, G. & Hulin, M. GRECO didactique, CNRS.

- Didactique et acquisition des connaissances scientifiques*. La pensée sauvage éditions, 109-126.
- Bautier, T., Boudarel, J., Colmez, F. & Parzysz, B. (1987). Représentation plane des Figures de l'espace. In In Vergnaud, G., Brousseau, G. & Hulin, M. GRECO didactique, CNRS. *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques*. La pensée sauvage éditions, 127-148.
- Bier, E. A. (1987). Skitters and jacks: interactive 3d positioning tools. In *I3D'86: Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics*, pages 183–196. ACM.
- Bimber, O., Miguel, L. & Stork, A. (2000). A multi-layered architecture for sketch-based interaction within virtual environments. *Computers & Graphics*, 24(6):851– 867.
- Cabri 3D©: Cabrilog – Innovative Maths Tools: <http://www.cabri.com/cabri-3d.html>
- Calque 3D© - A 3D dynamic geometry software: <http://www.calques3d.org/>
- Chen, M, Mountford, S. J. & Sellen, A. (1988). A study in interactive 3-D rotation using 2-D control devices. In *Proceedings of the 15th Annual Conference on Computer Graphics and interactive Techniques* R. J. Beach, Ed. SIGGRAPH '88. ACM, New York, NY, 121-129.
- Cohé, A., Décle, F. & Hachet, M. (2011). tBox: A 3D Transformation Widget designed for Touch-screens. *CHI 2011 Canada* 3005-3008.
- Colmez, F. & Parzysz, B. (1993). Le vu et le su dans l'évolution des dessins de pyramides du CE2 à la 2nd. In Bessto, A., Verillon, P. & Balacheff, N., *Espaces graphiques et graphismes d'espaces*. La pensée sauvage éditions, 35-55.
- Dolle, J.M. (1986). Réflexions épistémologiques concernant la représentation graphique de l'espace tridimensionnel.
- Efron, D. (1941). *Gesture and Environment*. Morningside Heights, New York : King's Crown Press.
- Ekman, P. & Friesen, W. (1969) The Reportorie of Nonverbal Behavior: Categories, Origins, Usage, and Coding, *Semiotica*, I, 1969. pp 49-98
- Geospace©: [37] AID-CREEM: <http://www.aid-creem.org/telechargement.htm>
- Görg, M T., Cebulla, M. & Garzon, S. R. (2010). A Framework for Abstract Representation and Recognition of Gestures in Multi-touch Applications, *Third International Conference on Advances in Computer-Human Interactions*, pp. 143-147.
- Grossman, T, Wigdor, D. & Balakrishnan, R. (2004). Multi-finger gestural interaction with 3d volumetric displays. In *Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User interface Software and Technology* (Santa Fe, NM, USA, October 24 - 27, 2004). UIST '04. ACM, New York, NY, 61-70. DOI=<http://doi.acm.org/10.1145/1029632.1029644>.
- Guillermain, H. (1986). Approche cognitive de la genèse de la représentation graphique en perspective. In Rabardel, P. & Weill-Fassina, A. *Le dessin technique: Apprentissage, utilisations, évolutions*. Hermès, 43-50.

Hancock, M., Carpendale, S. & Cockburn, A. (2007). Shallow-depth 3D interaction: Design and evaluation of one-, two- and three-touch techniques. *In Proc. CHI 2007*, pp. 1147-1156.

Hancock, M., Vernier, F., Wigdor, D., Carpendale, S. & Shen, C. (2006). Rotation and translation mechanisms for tabletop interaction. *In Proc. Tabletop*, pp. 79-86.

Hancock, M., Cate, T. & Carpendale, S. (2009). Stickytools: Full 6DOF force-based interaction for multi-touch tables. *In Proc. ITS*, pages 145–152.

Kaindl, G. (2010). Towards a flexible software framework for multi-touch application design. *Engineering Patterns for Multi-Touch Interfaces 2010*. A workshop of the ACM SIGCHI Symposium on Engineering Interactive Computing Systems. June 20, 2010.

Kammer, D., Wojdziak, J., Keck, M. & Taranko, S. (2010). Towards a formalization of multi-touch gesture. *ITS'10 novembre 7-10 2010 Saarbrücken*

Lao, S., Zhang, G., Ling, Y. & Wang, P.A. (2009). Gestural interaction design models for multi-touch displays. *Proceeding of British computer society conference on human-computer interaction* Cambridge, pp 440-446.

Martinet, A., Casiez, G. & Grisoni, L. (2010). The design and evaluation of 3D positioning techniques for multitouch displays. *Proceeding of 3DUI'10 IEEE computer society 5th symposium on 3D User Interface 2010*, 115 –118.

Martinet, A., Casiez, G. & Grisoni, L. (2010). The effect of DOF separation in 3D manipulation task with multi-touch displays. *VRST'10 the 17th ACM symposium on virtual reality software and technologies 2010*.

Morris, M., Huang, A., Paepcke, A. & Winograd, T. (2006). Cooperative gesture : multi-user gestural interaction for co-located groupware. *Proc CHI '06* New York ACM Press pp 1201-1210.

Moscovich, T. (2009). Contact area interaction with sliding widgets. *In UIST '09: Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, pages 13–22. ACM.

Nacenta, M.A., Baudisch, P., Benko, H. & Wilson, A. (2009). Separability of special manipulations in multi-touch interfaces. *In Proceedings of Graphics Interface 2009*, 175-182.

Nespoulous, J.-L., Perron, P. & Lecours, A. R. (1986). *Biological Foundations of Gestures: Motor and Semiotic Aspects*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, MJ.

Nielsen, M., Störing, M. & Moeslund, T.B. (2003). Granum E. : A Procedure for developing intuitive and ergonomic gesture interfaces for HCI. *In t'l gesture workshop 2003 LNCS vol 2915 Heidelberg springer-Verlag* pp409-420.

Nielson, G. M. & Olsen, D. R. (1986). Direct Manipulation Techniques for Objects Using 2D Locator Devices. *Proc. 1986 ACM Workshop on Interactive 3D Graphics*, Chapel Hill, NC.

Osta, I. (1987). “Analyse d’une sequence didactique. Représentations graphiques à l’aide d’un ordinateur comme médiateur dans l’apprentissage de notions de géométrie de l’espace”. In Vergnaud, G., Brousseau, G. & Hulin, M. GRECO

- didactique, CNRS. *Didactique et acquisition des connaissances scientifiques*. La pensée sauvage éditions, 1987, pp.165-184.
- Parzys, B. (1988). Voir et savoir – la représentation du “perçu” et du “su” dans les dessins de la géométrie de l'espace. *Bulletin APMEP*, n°364, 339-350.
- Piaget, J. & Inhelder, B. (1948). *The Child's Conception of Space*. New York: W. W. Norton.
- Piaget, J. (1947). *La psychologie de l'intelligence*. Paris: A. Colin. The psychology of intelligence. London: Routledge and Kegan Paul, 1951.
- Reiman, J. , Davidson P. & Han J. (2009). A screen-space formulation for 2D and 3D direct manipulation. *In Proceedings of the 22nd annual ACM symposium on User interface software and technology*, 69–78 UIST'09 October 4-7 Victoria, British Columbia Canada 2009
- Schmidt, R., Singh, K. & Balakrishnan, R. (2008). Sketching and composing widgets for 3d manipulation. *Computer Graphics Forum*, 27(2):301–310. Proceedings of Eurographics 2008.
- Tang, J.C. (1991). Findings from observational studies of collaborative work. *Int'l Man-machine studies* 43(2) pp 143-160.
- Weller, P. (1993). Interacting with paper on the digitaldesk. *Communication of ACM* 36(7) pp 87-96.
- Wilson, A.D. (2005). Play Anywhere : A compact interactive laptop projection-vision system. *Proc UIST '05* New York ACM press pp 83-92.
- Wittling, M., De Bodinat, G. & Raou, B. (1986). Genèse de la perspective spontanée. Etude génétique et expérimentale. *In Rabardel, P. & Weill-Fassina, A. Le dessin technique: Apprentissage, utilisations, évolutions*. Hermès, 29-35.
- Wobbrock, J., Morris, M. & Wilson, A. (2009). User-defined gestures for surface computing. *ACM CHI 2009* April 4-9 Boston Massachusetts.