



HAL
open science

Utilisation d'une Table Interactive avec objets Tangibles pour apprendre à l'école : études empiriques en milieu écologique

Sébastien Kubicki, Denis Pasco, Charlotte Hoareau, Ingrid Arnaud

► To cite this version:

Sébastien Kubicki, Denis Pasco, Charlotte Hoareau, Ingrid Arnaud. Utilisation d'une Table Interactive avec objets Tangibles pour apprendre à l'école : études empiriques en milieu écologique. Actes de la 28ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, Oct 2016, Fribourg, Suisse. pp.155-166, 10.1145/3004107.3004120 . hal-01383916

HAL Id: hal-01383916

<https://hal.science/hal-01383916v1>

Submitted on 19 Oct 2016

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

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

Utilisation d'une Table Interactive avec objets Tangibles pour apprendre à l'école : études empiriques en milieu écologique

Sébastien Kubicki
ENIB, Lab-STICC
UMR 6285,
F-29200 Brest
kubicki@enib.fr

Denis Pasco
UEB Brest,
CRÉAD EA 3875,
F-29200 Brest
denis.pasco@univ-
brest.fr

Charlotte Hoareau
UBO, Lab-STICC
UMR 6285,
F-29200 Brest
charlotte.hoareau@univ-
brest.fr

Ingrid Arnaud
Education Nationale,
Circo. Brest-Nord,
F-29200 Brest
ingrid.arnaud@ac-
rennes.fr

RÉSUMÉ

Nous décrivons dans cet article, les résultats de trois années d'études sur l'utilisation d'une Table Interactive avec objets Tangibles (TIT) pour le développement des capacités de raisonnement spatial d'élèves de Cours Préparatoire (CP). Pour cela nous avons, avec l'aide d'enseignants et d'une conseillère pédagogique, conçu et développé le *Jeu des Tours* pour la table interactive *TangiSense 2*. Nous avons ensuite mené des expérimentations en milieu écologique avec 68 élèves. Dans le cadre d'une première étude, nous avons comparé les résultats d'apprentissage de deux groupes d'élèves (Gr. Traditionnel vs. Gr. TIT). Les résultats de cette étude nous ont encouragé à en réaliser une seconde. Dans cette dernière, nous avons analysé la participation des élèves (physique et verbale) et la manière dont ils construisaient leurs connaissances en groupe lorsqu'ils jouaient au *Jeu des Tours* sur la TIT. Les résultats ont montré que les élèves amélioraient leurs performances en jouant sur la TIT et, collaboraient à travers l'externalisation et la recherche d'un consensus orienté par le conflit.

Mots Clés

Enfants ; Education ; Etude empirique ; Table interactive ; Interaction tangible ; Apprentissage ; Ecole.

ABSTRACT

We describe in this article the results of three-years study of using a Tangible Tabletop Interface (TTI) for the development of student learning in spatial reasoning abilities. In partnership with the French Department of Education and teachers, we have designed and built a serious game in mathematics, called *The Game of Towers* for the *TangiSense 2* interactive tabletop. Then, we conducted « in the wild » experiments with 68 students. As part of a first study, we compared the learning

outcomes of two groups of students (Gr. Traditional vs. Gr. TTI). The results of this study have encouraged us to make a second experiment. In the latter, we analyzed child participation (physical and verbal) and the social modes of knowledge co-construction when they played the game on the TTI. The results showed that students improved their performance by playing the game on the TTI and collaborated through externalization and conflict-oriented consensus.

Author Keywords

Children; Education; Empirical Study; Tangible Interactive Tabletop; Tangible Interaction; Learning.

ACM Classification Keywords

H.5.2. Information interfaces and presentation: Evaluation / methodology.

INTRODUCTION

L'enseignement et l'apprentissage bénéficient aujourd'hui des avancées technologiques. Dans les écoles, il est maintenant possible de rencontrer des plates-formes d'interaction comme les tableaux blancs interactifs ou les tablettes [13, 20, 31]. Ces technologies permettent aux professeurs de développer de nouvelles façons d'enseigner et aux élèves de nouvelles façons d'apprendre. Par ailleurs, des recherches en Interaction Homme-Machine (IHM) se focalisent sur de nouvelles plates-formes pouvant servir comme un outil pédagogique : les tables interactives (voir Figure 1).



Figure 1. Trois élèves de CP utilisant une table interactive avec objets tangibles en classe

Les tables interactives sont très différentes des technologies utilisées actuellement dans les écoles. En effet, une table interactive renvoie à un espace de travail collaboratif et co-localisé permettant de faire intervenir plusieurs utilisateurs en même temps. Actuellement, il existe plusieurs types de table interactive. Par exemple les tables tactiles (ou *multitouch*), pour lesquelles la surface tactile permet de détecter la position des doigts et ainsi agir au minimum comme un pointeur de souris avec l'ensemble des actions offertes par celle-ci (ex. le clic, le maintien de clic, le double clic, etc.). Ou encore les Tables Interactives avec objets Tangibles (TIT), pour lesquelles les interactions sont rendues possibles en utilisant uniquement un (ou des) objet(s) tangible(s) posé(s) sur la table. Les actions étant alors liées à la position de ceux-ci. Notons que certaines tables interactives permettent de coupler ces deux types d'interactions (tactiles et tangibles) offrant ainsi plus de possibilités aux utilisateurs.

Les tables interactives permettent donc d'afficher des objets virtuels manipulables par interactions tactiles ou de détecter la présence d'objets tangibles sur leur surface afin de coupler l'environnement numérique aux objets du monde réel. De par les caractéristiques techniques et les interactions que les tables interactives proposent, des chercheurs ont suggéré qu'elles pouvaient favoriser le processus d'enseignement et d'apprentissage à l'école [5, 21, 22, 30].

Cependant, ces recherches ont principalement été menées sur des tables interactives tactiles. Peu de recherches ont été conduites sur TIT. De plus, les auteurs s'accordent à dire que ce domaine de recherche reste jeune et que nous manquons de preuves empiriques pour conclure sur l'efficacité des tables interactives à promouvoir l'apprentissage en classe [3, 15].

Afin de répondre à ce manque d'études empiriques, nous avons centré nos recherches sur l'évaluation de l'utilisation d'une TIT dans le milieu écologique de la classe en émettant l'hypothèse que cette technologie pourrait favoriser l'apprentissage.

Après une revue de la littérature présentant les interfaces et interactions tangibles, puis un recentrage sur les tables interactives avec objets tangibles pour l'apprentissage, nous présentons le contexte dans lequel se sont inscrites deux expérimentations menées en classes. Nous poursuivons cet article par la présentation de ces deux études, puis de leurs résultats. Nous terminons par une discussion et une présentation des limites de nos études.

ETAT DE L'ART

Interagir avec une interface tangible (TUI, *Tangible User Interface* en anglais) est très différent de l'interaction avec une interface graphique (GUI, *Graphical User Interface* en anglais) [43]. De nombreuses études ont démontré les bénéfices des TUI, comme par exemple vivre une expérience plus naturelle, intuitive et/ou conviviale [9, 17]. Les TUI offrent également (1) une opportunité de manipulation directe qui peut être qualifiée d'optimale avec l'interface [37] et, (2) une opportunité de manipuler des d'objets, une caractéristique d'une importance

particulière pour l'apprentissage chez les jeunes enfants [1]. En effet, les valeurs éducatives de la manipulation d'objets ont été promues par Maria Montessori : « les enfants construisent leur image mentale du monde à travers des actions et des réponses sensorimotrices et, grâce à la manipulation physique, ils deviennent conscients de la réalité [4] ».

Dans cette section, nous introduisons premièrement et de manière générale les interfaces tangibles (TUI). Dans un deuxième temps, nous présentons le potentiel des TIT. Enfin nous exposons les recherches utilisant les TIT pour l'apprentissage.

Interagir avec des objets tangibles

Les chercheurs en IHM ont défini les TUI comme étant un type d'interface qui exploite la représentation physique pour connecter le monde réel au monde numérique. Selon Ishii et Ullmer [17], les TUI « augmentent le monde physique réel en couplant des informations numériques aux objets physiques et aux environnements de tous les jours ». Ainsi, l'interaction ne s'effectue plus uniquement à travers l'utilisation, par exemple, d'une souris sur des objets virtuels affichés sur un écran, mais directement avec des objets réels via l'interface (tangible). De plus, « l'information numérique devient palpable et directement perceptible à travers nos sens périphériques » [18], provoquant la sensation d'être connecté au monde réel. Les TUI peuvent être considérées comme un nouveau paradigme sans artefact de communication pouvant interrompre les processus sensorimoteurs de l'utilisateur. Dans une TUI les objets peuvent avoir un statut ambivalent. Ils peuvent faire partie de l'application mais peuvent également eux-mêmes devenir un dispositif d'interaction (un interacteur) agissant sur l'interface [26]. Une TUI s'inscrit dans un espace réel ce qui nécessite plus d'attention de l'utilisateur (vs. GUI). Par exemple, les interfaces tangibles peuvent nécessiter différentes postures du corps et de la motricité fine [2]. Enfin, l'avantage de l'affordance naturelle des objets tangibles et/ou de l'interaction avec les deux mains a également été mis en avant [10, 11]. La capacité d'interagir librement avec des objets en les touchant ou en les déplaçant constitue donc le cœur de cette forme d'interaction.

Interagir sur des tables interactives... avec des objets tangibles

Les tables interactives offrent de nombreux avantages. Tout d'abord, elles proposent un large espace de travail permettant à l'utilisateur à la fois d'agir, de parler et/ou d'observer ce que les autres utilisateurs sont en train de faire [27]. Ensuite, les utilisateurs peuvent être positionnés autour de la table, ce rapprochement spatial offre l'opportunité d'améliorer significativement la communication [35], ainsi que la collaboration entre les utilisateurs [11]. De plus, l'interaction avec les deux mains est encouragée mobilisant ainsi la richesse des capacités des bras et des mains [11]. Enfin, les utilisateurs sont toujours visibles les uns des autres ce qui permet la compréhension des gestes expressifs rendant les interactions plus naturelles et intuitives [9]. Interagir avec des objets tangibles sur une table interactive s'effectue en trois dimensions sur une surface horizontale. Les objets

tangibles peuvent être utilisés par tout le monde, y compris les enfants, les personnes âgées ou les personnes présentant des handicaps (ex. quand le toucher est l'unique moyen d'interagir avec le monde) [8]. En conséquence, ce type d'interface et d'interaction présente un grand potentiel à être utilisé en école pour promouvoir l'apprentissage.

Les tables interactives avec objets tangibles pour l'apprentissage

Comme présenté dans les sections précédentes, le potentiel des TUI pour encourager l'apprentissage est principalement lié à la manipulation physique des objets. Par ailleurs, la littérature scientifique en informatique, psychologie et sciences de l'éducation confirme cette vision. Il a été démontré que les diverses formes d'interactions physiques pouvaient améliorer la mémoire, la performance et l'apprentissage [6, 16]. Il y a donc clairement des avantages théoriques quant à l'utilisation des TIT pour l'apprentissage. Des recherches actuelles visent à démontrer les avantages pratiques de l'utilisation de ces tables.

Par exemple, l'application « *read-it* » développée par Sluis *et al.* [38] montre que le couple table interactive et objets tangibles peut être une manière enrichissante d'enseigner la lecture aux enfants de 7 à 9 ans, en proposant sur la table un espace dédié pour chaque enfant et un espace commun au centre. Marco, Cerezo and Baldassarri [28] ont utilisé leur prototype de table *NIKVision* avec objets tangibles pour créer un jeu d'élevage d'animaux pour les enfants de 3 à 6 ans. Les auteurs ont conclu que la combinaison d'une TIT et d'animations 3D sur un écran déporté semblait pertinente pour une utilisation avec de jeunes enfants. Do-Lenh et ses collègues [7] ont présenté les résultats d'une étude empirique en classe explorant l'usage d'une TIT sur l'apprentissage et la performance d'élèves dans le cadre d'une tâche collaborative. Les premiers résultats ont montré que la table interactive améliorait la performance mais qu'elle n'avait pas d'incidence sur l'apprentissage. Plus récemment, Shaer *et al.* [34, 35], ont développé l'application « *G-Nome Surfer* » pour une table interactive *multitouch* et tangible. Cette application ayant pour objectif d'aider des étudiants à comprendre la génomique où une grande partie d'informations abstraites doit être présentée. Leur étude a montré les bénéfices des tables interactives avec objets tangibles dans le processus d'apprentissage, comparées à une GUI traditionnelle. Au même titre, Xie, Antle et Motamedi [42] ont montré que des enfants âgés de 7 à 9 ans déclarent avoir plus de plaisir à travailler avec une TIT comparé à une GUI traditionnelle. Plus tard, Shaer *et al.* [36] ont proposé un processus de conception participatif pour améliorer l'enseignement des sciences au collège. Pour cela, ils ont proposé « *SynFlo* », une application interactive illustrant les concepts de base de la biologie synthétique pour des non-scientifiques, sur une table interactive *Microsoft PixelSense* avec des objets tangibles. Cuendet *et al.* [5] ont repris les travaux de Do-Lenh *et al.* [7] et ont proposé trois environnements d'apprentissage basés sur l'usage de tables interactives avec objets tangibles en situation réelle

en classe. Ces environnements d'apprentissage ont été co-conçus avec des enseignants. Les auteurs présentent dans leur article les caractéristiques qui ont émergé des cycles de co-conception et fournissent un ensemble de recommandations pour la conception de tels environnements d'apprentissage. Plus récemment, Anastasiou, Maquil, and Ras [2] ont utilisé une TIT dans des contextes de résolution de problèmes collaboratifs. Les participants devaient découvrir en quoi des paramètres externes (représentés par des objets tangibles sur une table interactive) pouvaient affecter la production d'électricité d'une éolienne. Les résultats ont indiqué que 78,5% des gestes des participants étaient en relation avec leur discours et 85,4% étaient en relation avec la table interactive (c'est-à-dire des manipulations d'objets impliquant le placement, le traçage, la rotation et le déplacement d'objets). Ces gestes ont créé une compréhension commune et partagée (travail collaboratif) de la simulation d'un environnement complexe.

L'ensemble de ces recherches renforce l'idée que les tables interactives avec objets tangibles pourraient être un outil favorable pour l'apprentissage. Cependant, si les bénéfices de l'utilisation des tables interactives avec objets tangibles pour l'apprentissage sont théoriquement bien établis dans la littérature scientifique [6, 33, 39, 44], nous manquons encore de preuves empiriques [3, 15, 29].

Nos études menées en classe visent à contribuer à ce manque de preuves empiriques. Leur objectif commun est d'évaluer l'impact d'une TIT sur l'apprentissage des capacités de raisonnement spatial d'élèves en milieu écologique.

CONTEXTE DE NOS ETUDES

Ces recherches, en partenariat avec l'Education Nationale, l'Inspection Académique du Finistère et plus particulièrement la circonscription de Brest-Nord, ont débuté en 2013. Ils poursuivent les travaux menés précédemment par Kubicki *et al.* [23, 25]. Ces travaux reposent sur un jeu de mathématiques appelé le « *Jeu des Tours* » utilisé dans les salles de classe sous forme traditionnelle (papier) par les enseignants des écoles élémentaires. En partenariat avec des enseignants et d'une conseillère pédagogique, nous avons conçu et développé une version du jeu adapté à la table interactive *TangiSense 2* [25].

La table interactive *TangiSense*

La table *TangiSense* (conçue et développée par la société RFIdées) est une table interactive ayant la particularité de proposer uniquement des interactions tangibles. Dans sa nouvelle version, *TangiSense 2* (lire [24] pour les caractéristiques de la *TangiSense 1*) est composée de 24 « dalles » contenant chacune 16 antennes RFID (4 x 4) de 3,75 cm de côté sur une surface de 90cm x 60cm. Les dalles sont associées entre elles par une interface de contrôle reliée à l'ordinateur hôte par un bus Ethernet. Dans cette version, la table *TangiSense* possède un écran LCD de 47 pouces permettant l'affichage d'objets virtuels avec lesquels il est possible d'interagir grâce aux objets tangibles posés à sa surface (*cf.* Figure 1).

Présentation générale du Jeu des Tours

Le *Jeu des Tours* a été créé par Dominique Valentin [40], un professeur de mathématiques de l'actuelle école supérieure du professorat et de l'éducation. Ce jeu est une activité traditionnellement utilisée par des professeurs des écoles afin d'appréhender le raisonnement spatial dès le plus jeune âge. Pour cela, les enfants jouent au jeu en plaçant des tours de différentes hauteurs sur une grille entourée de chiffres. Nous proposons de présenter plus en détails le jeu et ses règles plus loin dans cette section.

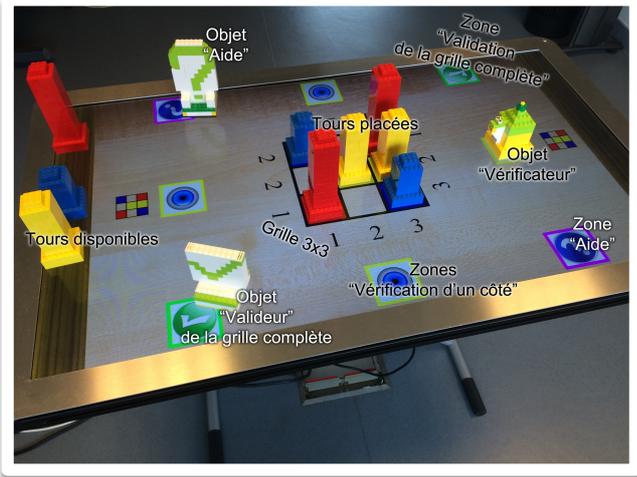


Figure 2. Le *Jeu des Tours* développé pour *TangiSense*

Objectifs pédagogiques du Jeu des Tours

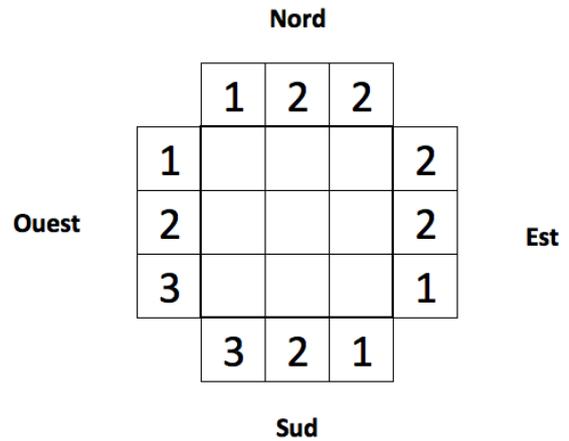
Plusieurs objectifs pédagogiques sont visés par cette activité. Premièrement, faire apprendre aux enfants que lorsque deux objets possèdent la même forme mais des hauteurs différentes, l'un peut masquer l'autre. Deuxièmement, utiliser des informations numériques dans un cadre spatial pour résoudre un problème mathématique. Ainsi, selon le nombre d'objets (ex. trois objets de même forme mais de tailles différentes ; tailles 1, 2, 3), les enfants doivent comprendre que le plus grand des objets (taille 3) peut cacher les deux autres, mais également que l'objet intermédiaire (taille 2) peut cacher l'objet le plus petit (taille 1) mais pas le plus grand (taille 3), etc. Troisièmement, faire prendre en compte plusieurs contraintes par les enfants afin de remplir correctement une grille (cf. règles du jeu). Ces objectifs pédagogiques visent le développement des capacités de raisonnement spatial des élèves mais aussi la résolution de problèmes (voir Figure 2).

Règles du jeu

Nous détaillerons dans cette section les règles pour le format de jeu utilisé par les enfants lors de nos expérimentations (lire [23] pour les règles complètes du jeu).

Dans ce jeu, les enfants doivent positionner des tours sur une grille. Une tour peut avoir une hauteur comprise entre 1 et 3 (prenons l'unité cube pour définir la hauteur). Dans cette version du jeu, les enfants manipuleront neuf tours : trois tours de couleur bleue d'une hauteur de 1 cube, trois de couleur jaune d'une hauteur de 2 cubes et trois de couleur rouge d'une hauteur de 3 cubes. Le plateau de jeu est une grille de 3 x 3 cases ; chaque côté du plateau de

jeu peut être associé à un point cardinal : Nord, Sud, Est et Ouest. Les contraintes indiquant la façon dont les tours doivent être positionnées sont exprimées par des chiffres indiqués au début et à la fin de chaque ligne et de chaque colonne tout autour de la grille. Les chiffres pourront être 1, 2 ou 3. Chaque chiffre correspond au nombre de tours qu'il faut apercevoir sur chaque colonne (ou ligne) d'un côté de la grille. Les enfants doivent donc placer l'ensemble des tours (qu'ils choisissent parmi les neuf tours disponibles) de manière à respecter les contraintes numériques indiquées aux extrémités des lignes et des colonnes. La Figure 3 montre un exemple de plateau de jeu.



Grille de 3x3 cases

Figure 3. Exemple de plateau de jeu

Une solution pour la colonne de gauche de la Figure 3 serait de placer les tours de hauteur 3, puis 2, puis 1 en partant du Nord vers le Sud. Ainsi selon un point de vue Nord, un enfant verra seulement la tour la plus haute (taille 3), mais un autre enfant positionné selon un point de vue Sud verra les trois tours (de la plus petite à la plus haute). De cette manière, les contraintes de chaque extrémité de la colonne sont satisfaites. Pour compléter la grille, les enfants doivent satisfaire l'ensemble des contraintes de chaque ligne et de chaque colonne de la grille. Les neuf tours devront donc être placées sur la grille.

Le jeu possède deux règles concernant le positionnement de deux tours de hauteur identique. La première règle autorise les élèves à positionner deux tours de la même hauteur sur la même ligne ou la même colonne (plus facile), la seconde interdit le positionnement de deux tours de la même hauteur sur la même ligne ou sur la même colonne (plus difficile). Une grille peut ainsi avoir plusieurs solutions.

C'est l'enseignant qui décidera de la règle en fonction de ses objectifs et du travail qu'il envisage avec les élèves. Pour nos études, les deux règles étant implémentées sur notre jeu pour la TIT, les enseignants ont choisi la règle numéro 2 (exercice plus difficile). Enfin, rappelons que nous avons présenté ici uniquement la situation de jeu que nous avons expérimenté avec des élèves. De plus amples développements ont été effectués. Ainsi le jeu est

progressif et adaptatif selon l'âge des enfants. Par exemple une grille 2x2 ou 4x4 peut-être automatiquement générée par un algorithme vérifiant leur faisabilité. Le principe du jeu reste le même pour une grille de 4x4, mais la difficulté augmente considérablement.

Les objets tangibles

Deux types d'objets tangibles ont été développés pour le jeu (assemblés en briques LEGO®) : (1) des tours d'une hauteur de 1 à 3 et (2) différents objets « interacteurs » [26] qui communiquent avec la TIT. Il y a trois types d'objets « interacteurs » : (1) un objet « vérificateur » qui va vérifier la position des tours sur la grille et attirer l'attention des enfants sur leurs erreurs (voir objet « vérificateur » sur la Figure 2), (2) un objet « valideur » qui va vérifier la grille entière lorsque les neuf tours sont placées et qui va annoncer aux enfants si les tours sont correctement ou incorrectement placées (voir objet « valideur » sur la Figure 2) et, (3) un objet « aide » qui va suggérer une ligne ou une colonne sur laquelle l'enfant doit se focaliser car une erreur a été détectée (voir objet « aide » sur la Figure 2).

EXPERIMENTATIONS

Afin de contribuer au manque de données empiriques concernant l'utilisation de tables interactives avec objets tangibles pour l'apprentissage, nous avons mené deux études avec des élèves de cours préparatoire (CP) après accord de l'Inspection Académique. Pour cela, nous avons déployé notre plate-forme en classe afin de déterminer, d'évaluer et d'analyser les avantages d'une TIT sur l'apprentissage des capacités de raisonnement spatial d'élèves dans un contexte écologique.

Nous présentons ici le détail de ces études qui abordent chacune une question différente. En effet, notre première étude vise à répondre à la question : « Une TIT permet-elle l'apprentissage du raisonnement spatial avec des élèves de CP ? ». L'objectif de cette première étude est de comparer les résultats d'apprentissage des élèves lors d'une tâche de raisonnement spatial exécutée sur papier ou sur TIT. Notre seconde étude vise ensuite à répondre à la question : « Sur TIT, comment cet apprentissage s'opère-t-il ? ».

Pour chacune de nos études, nous débutons en présentant les participants et le protocole expérimental. Nous poursuivons en décrivant le matériel utilisé. Nous terminons en présentant les données collectées et la manière dont nous les avons analysées.

Etude 1

Participants et protocole expérimental

Trois classes de CP ont participé à cette étude représentant un total de 68 élèves ($M = 6.68$; $E-T = 0.42$; 40% de filles ; 60% de garçons). Les élèves et les enseignants ont été informés des objectifs de l'étude et une autorisation de participation a été obtenue des parents ou représentants légaux pour tous les élèves. Aucun élève ne participait à un programme d'éducation pour enfant à besoins spécifiques. Les élèves ont été séparés en deux groupes. Un premier groupe a pratiqué le *Jeu des Tours* dans son format traditionnel (Groupe Traditionnel ;

$N=26$). Dans ce groupe, lorsque les élèves pensaient avoir trouvé une solution correcte au jeu, ils appelaient les enseignants afin d'obtenir une vérification de la position des tours sur la grille. Un deuxième groupe a pratiqué le *Jeu des Tours* sur la TIT (Groupe TIT ; $N=42$). Dans ce groupe, lorsque les élèves pensaient avoir trouvé une solution correcte au jeu, ils utilisaient l'objet « vérificateur » pour vérifier la position des tours sur la grille. Notons que les objets tangibles « valideur » et « aide » n'ont pas été utilisés par le groupe TIT dans la mesure où les enseignants n'ont pas apporté d'aide, ni d'informations sur la validation complète de la grille pour le groupe Traditionnel. Dans chaque groupe, les élèves ont été aléatoirement répartis en sous-groupes de trois élèves (exceptionnellement deux).

Cette première étude s'est déroulée en trois phases pour les deux groupes. Durant la première phase (dite de familiarisation), nous avons collecté les informations démographiques de chaque élève et les règles du jeu leur ont été présentées. Ensuite, les élèves ont complété une grille de jeu. Enfin, les élèves ont passé un test d'évaluation individuel de leurs capacités de raisonnement spatial (pré-test). Durant la deuxième phase (dite d'apprentissage), les élèves ont résolu successivement trois grilles. Durant la dernière phase (dite d'évaluation), les élèves ont passé le test d'évaluation (post-test). Notons, que toutes les données ont été collectées dans le milieu écologique de la classe et qu'aucune limite de temps n'a été imposée aux élèves pour compléter les tests.

Matériel

Dans la mesure où les élèves de CP apprennent à lire et à écrire, nous avons conçu un test d'évaluation sous forme de six photographies. Chaque photographie représente les neuf tours placées sur une grille de 3x3. Chaque élève doit indiquer si les tours sont bien ou mal placées pour deux côtés visibles de la grille en entourant un *oui* ou un *non* placés sous chaque photographie. Pour le groupe Traditionnel, les photographies ont été réalisées avec le matériel de classe (cubes empilables formant les tours et grilles imprimées sur feuille A4). Pour le groupe TIT, les photographies ont été réalisées avec les objets tangibles décrits précédemment et les grilles générées par la TIT.

Données collectées

Pour cette première étude, nous avons recueilli les résultats des élèves en matière de raisonnement spatial, dans les deux groupes (Traditionnel et TIT). Ces données ont été documentées en utilisant les pré et post-tests.

Analyse des données

Les tests ont été évalués sur une échelle de 6 points (1 point pour chaque réponse correcte). Des analyses de variance ont été réalisées pour comparer les scores de chaque groupe (Traditionnel et TIT) entre le pré-test et le post-test. Ensuite, des tests de Student (test t) pour échantillons indépendants ont permis de comparer les scores des deux groupes concernant le pré-test et le post-test. Ces analyses ont été réalisées en utilisant le logiciel SPSS® (v.21).

Résultats

Le Tableau 1 présente les résultats (moyennes et écart-types) des élèves aux pré-tests et aux post-tests pour les deux groupes.

	Groupe Traditionnel (N=26)	Groupe TIT (N=42)
	M (E-T)	M (E-T)
Pré-test	3.92 (0.84)	4.36 (1.32)
Post-test	4.38 (1.30)	5.26 (1.21)

Tableau 1. Résultats des groupes aux pré-tests et post-tests.

Les analyses de variance indiquent une différence significative entre les résultats des élèves au pré-test et au post-test pour le groupe TIT (*Wilks' Lambda* = 0.676, $F(1,41) = 19.682$, $p = .000$). Ces différences ne sont pas significatives pour le groupe Traditionnel (*Wilks' Lambda* = 0.90, $F(1,25) = 2.744$, $p = .11$).

Le test t de comparaison entre les deux groupes est significatif pour le post-test ($t(66) = 2.824$, $p = .006$). En revanche il n'est pas significatif pour le pré-test ($t(66) = 1.494$, $p = .14$).

Les résultats des élèves dans les deux groupes progressent entre le pré-test et le post-test. Cependant, ce progrès n'est significatif que pour le groupe TIT. De plus, les résultats de ce groupe sont significativement supérieurs aux résultats du groupe ayant pratiqué le jeu dans son format traditionnel. Cette première étude montre que les TIT permettent l'apprentissage du raisonnement spatial, au même titre qu'une situation traditionnelle (papier). Toutefois, les performances des élèves du groupe TIT, bien que légèrement supérieures à celles du groupe traditionnel, ne permettent pas de conclure que « l'on apprend mieux sur TIT ». Ces résultats nous ont invité à prolonger cette première étude par une seconde visant à étudier la participation (physique et verbale) d'élèves et la manière dont ils construisent leurs connaissances en groupe lorsqu'ils jouent au *Jeu des Tours* sur la TIT. Les opportunités de participation et de collaboration sont en effet les deux dimensions avancées dans la littérature pour présenter le bénéfice des TIT pour l'apprentissage [29, 43].

Etude n°2

Participants et protocole expérimental

Les élèves ayant pratiqué le jeu sur TIT lors de la première étude (Groupe TIT) ont participé à cette seconde expérimentation. Ils représentent un total de 42 élèves ($M = 6.63$; $E-T = 0.58$; 40% de filles). Ces élèves ont été séparés en groupe de trois (exceptionnellement deux) pour participer à une session sur la TIT consistant à résoudre à la suite trois grilles du *Jeu des Tours*. Durant cette session, chaque élève était équipé d'un microphone permettant d'enregistrer ses verbalisations. Les élèves étaient aussi filmés de manière à documenter leur participation physique durant les jeux et leur performance de groupe dans la résolution des grilles. Notons qu'en raison des contraintes liées aux expérimentations en

milieu naturel, les études 1 et 2 se sont déroulées de manière concomitante pour le groupe TIT. Ainsi, le recueil des données de cette seconde étude s'est fait lors de la première étude avec les équipements audio et vidéo mobilisés.

Matériel

Pour cette seconde étude, nous avons collecté les données grâce à un équipement qui nous a permis d'enregistrer à la fois l'audio et la vidéo. Afin d'enregistrer les verbalisations des enfants, nous avons utilisé quatre micros-cravates *Shure PG185* et quatre émetteurs ceinture *Shure BLX1*. Les micros étaient connectés à deux récepteurs sans fil *Shure BLX88* disposant chacun de deux canaux. Un canal a été attribué à chaque enfant en liant les récepteurs sans fil à une carte son externe (*M-Audio, M-Track Quad*). La carte son a été branchée sur un ordinateur (Apple, MacBook Pro) et nous avons utilisé le logiciel recommandé par le fabricant (*Avid technology, Pro Tool Express*) pour la capture audio. Avec ce matériel spécifique, les élèves étaient libres de leurs mouvements et n'avaient pas à porter de matériel intrusif (voir Figure 1). Pour les vidéos et les photographies, nous avons utilisé deux petites caméras (*Sony HDR- PJ260VE*) placées sur des trépieds en deux points stratégiques de la salle de classe afin de capturer et d'enregistrer toute la scène (voir Figure 4), à savoir les élèves et leurs manipulations sur la TIT. Le logiciel *iMovie* d'Apple a été choisi pour traiter les vidéos.



Figure 4. Capture de l'audio et de la vidéo en classe

Données collectées

De manière identique à Harris *et al.* [14] et Shaer *et al.* [34], nous avons recueilli la participation physique et verbale des élèves. La participation physique a été calculée en se basant sur le temps passé à manipuler les tours tandis que la participation verbale a été mesurée en nombre d'énonciations par minute. La performance de groupe a été mesurée par le temps passé à résoudre chaque grille. Enfin, pour évaluer la manière dont les élèves construisent en groupe des connaissances argumentatives en matière de raisonnement spatial, nous avons mobilisé le cadre théorique de Weinberger et Fischer [41]. Ces auteurs ont formalisé un cadre théorique pour analyser la construction de connaissances argumentatives dans le cadre d'apprentissages

collaboratifs en environnements numériques. Ils ont identifié cinq modes sociaux de co-construction de connaissances se référant à la manière dont des individus collaborent sur une tâche et formulent des arguments : l'externalisation (EXT), l'élicitation (ELICIT), le consensus rapide (RAP), le consensus orienté par l'intégration (INTEGR) et le consensus orienté par le conflit (CONFLIT). Chacun de ces modes est présenté, défini et illustré à l'aide de données dans le Tableau 2.

Catégories	Définition	Exemples provenant des transcriptions
Externalisation (EXT)	Une verbalisation adressée à un groupe sans aucune référence explicite ou implicite à une verbalisation précédente.	“Celle-là va là.” “Je place celui-ci ici.” “La jaune va là.”
Elicitation (ELICIT)	Les apprenants demandent activement des informations à leurs partenaires d'apprentissage.	“Est-ce que je place la rouge ici ?” “Est-ce que c'est bon ?” “Est-ce que je dois placer une bleue ici ?”
Consensus rapide (RAP)	L'acceptation de la verbalisation d'un pair sans aucune modification ou indication que cette perspective a été reprise par l'apprenant.	“Je suis d'accord.” “C'est bon.” “Bien.”
Consensus orienté par l'intégration (INTEGR)	Les apprenants reprennent les perspectives de leurs partenaires d'apprentissage.	“Oui, celle-là va là parce qu'elle cache les autres tours.” “Je suis d'accord, la jaune va là parce qu'on doit voir trois tours sur cette ligne.”
Consensus orienté par le conflit (CONFLIT)	Les apprenants n'acceptent pas les contributions de leurs partenaires d'apprentissage.	“Non, celle-ci ne va pas là.” “Non, pas ici.” “Non, je ne suis pas d'accord.”

Tableau 2. Catégories des modes sociaux de co-construction de connaissances proposés par Weinberger et Fischer [41]

Analyse des données

Deux chercheurs ont examiné séparément les vidéos de manière à déterminer la participation physique des élèves et leurs performances sur les trois résolutions de grilles. Les verbalisations des élèves ont été retranscrites de manière chronologique. Les deux chercheurs ont séparément codé les mêmes données en utilisant les cinq catégories de modes sociaux de co-construction de connaissances. Ils ont comparé leur codage et chaque désaccord a été résolu en se référant à la définition des catégories (cf. Tableau 2). Chaque chercheur a enfin examiné les verbalisations retranscrites pour déterminer la participation verbale des élèves dans chaque jeu. Des analyses répétées de variance ont été effectuées pour

déterminer des différences significatives dans la performance des groupes, les modes sociaux de co-construction de connaissances et la participation verbale des élèves entre le premier et le troisième jeu en utilisant le logiciel SPSS® (v.21).

Résultats

Participation

Le Tableau 3 présente les résultats de la participation physique (exprimée en pourcentage de temps passé à manipuler les tours) et verbale (exprimée en nombre d'énonciations par minute) pour l'ensemble des groupes.

	Jeu 1 (N=42) M (E-T)	Jeu 2 (N=42) M (E-T)	Jeu 3 (N=42) M (E-T)
Participation physique % de temps	23 (14)	25 (12)	24 (12)
Participation verbale énonciations/min	12.12 (5.09)	14.88 (6.55)	17.62 (8.53)

Tableau 3. Participation des élèves (physique et verbale)

Les élèves passent 23% de leur temps à placer ou déplacer les tours sur la TIT pour trouver une solution à la première grille du jeu, 25% pour la seconde et 24% pour la troisième. Il n'y a pas de différence significative concernant ce pourcentage de temps à travers les jeux.

Les résultats pour la participation verbale des élèves indiquent plus de 12 énonciations par minute pour le premier jeu, plus de 14 pour le second et plus de 17 pour le dernier. Même si le nombre d'énonciations par minute augmente du premier au dernier jeu, les différences ne sont statistiquement pas significatives.

Performance de groupe

Le Tableau 4 présente le temps passé pour chaque groupe de trois élèves (exceptionnellement deux) à résoudre chaque jeu.

Numéro de groupe	Jeu 1 (min)	Jeu 2 (min)	Jeu 3 (min)
1	14:19	04:37	04:09
2	13:00	03:20	02:27
3	13:12	01:46	07:44
4	05:24	03:27	02:35
5	18:13	04:41	04:02
6	14:48	11:15	02:54
7	15:27	04:11	04:11
8	06:40	04:10	02:05
9	07:10	05:43	04:35
10	06:47	02:38	01:48
11	04:38	03:42	02:44
12	08:01	03:39	01:33
13	11:40	07:30	06:56
14	10:05	06:00	03:54
15	13:30	09:13	04:17
M (E-T)	10:05 (4.35)	5.49 (3.15)	3:54 (1.46)

Tableau 4. Performance de groupe (temps passé à résoudre une grille) pour chaque jeu

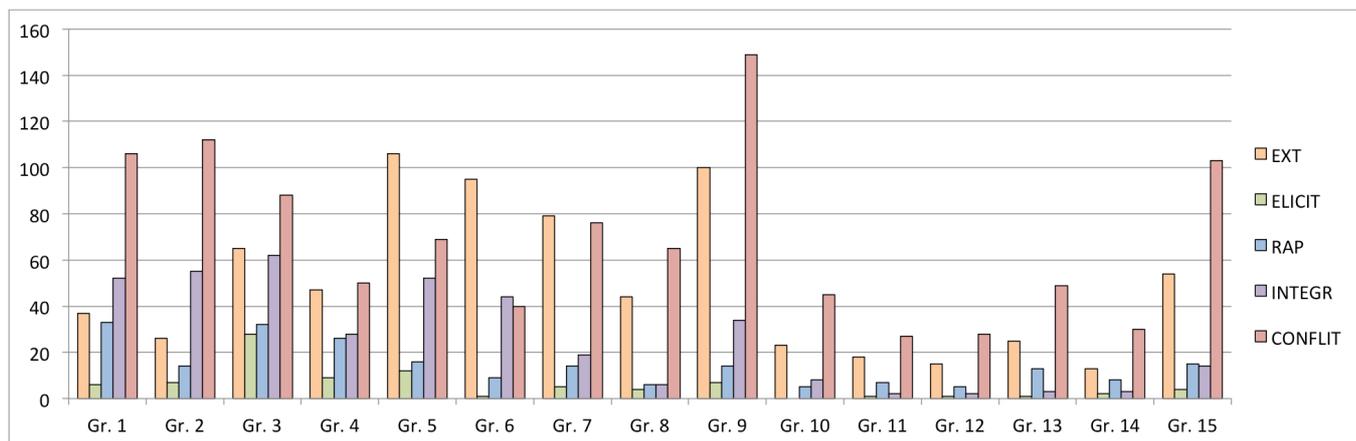


Figure 5. Nombre d'énonciations (total par groupe) dans les différentes catégories proposées par Weinberger et Fischer [41]

Le temps passé pour chaque groupe à résoudre le problème décroît du premier au troisième jeu. Les groupes passent en moyenne 10.05 minutes à résoudre le premier jeu, 5.49 minutes pour résoudre le second et 3.54 minutes pour résoudre le dernier. La Figure 6 représente cette diminution du premier au troisième jeu.

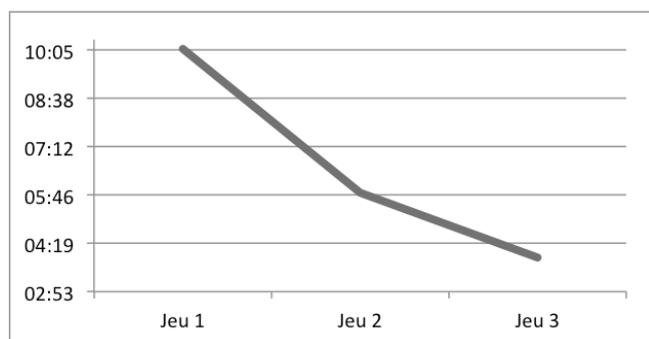


Figure 6. Evolution de la moyenne de performance des groupes (temps passé à résoudre une grille) pour les trois jeux

Le temps passé à résoudre une grille décroît significativement du premier au troisième jeu ($Wilks' \Lambda = 0.30, F(2,13) = 15.04, p = 0.000$). Les comparaisons par paires indiquent une différence significative entre le premier et le deuxième jeu ($p = 0.03$), entre le premier et le troisième jeu ($p = 0.000$) mais pas entre le deuxième et le troisième jeu ($p = 0.23$). Autrement dit, la performance des groupes ne s'améliore pas de manière significative après le second jeu.

Modes sociaux de co-construction de connaissances

La Figure 5 présente le nombre d'énonciations de chaque groupe d'élèves reliées aux différentes catégories de modes sociaux de co-construction de connaissances.

Les élèves résolvent majoritairement le problème posé par chaque grille à travers l'externalisation et le consensus orienté par le conflit. Les groupes 5, 6 et 7 collaborent majoritairement à travers l'externalisation tandis que les autres groupes collaborent principalement à travers un consensus orienté par le conflit.

Les résultats indiquent une différence significative entre le nombre d'énonciations dans les différentes catégories ($Wilks' \Lambda = 0.147, F(4,11) = 15.95, p = 0.000$).

Les comparaisons par paires révèlent une différence significative entre la catégorie « consensus orienté par le conflit » et les autres catégories ($p = .000$ avec l'élicitation et consensus rapide et, $p = .001$ avec le consensus orienté par l'intégration). En résumé, les élèves mobilisent l'externalisation (*i.e.*, verbalisation adressée à un groupe sans aucune référence explicite ou implicite à une verbalisation précédente) et le consensus orienté par le conflit (*i.e.* ne pas accepter les contributions de ses partenaires d'apprentissage) pour résoudre les grilles du jeu.

La Figure 7 présente le nombre total d'énonciations pour chaque catégorie de modes sociaux de co-construction de connaissances dans les trois différents jeux.

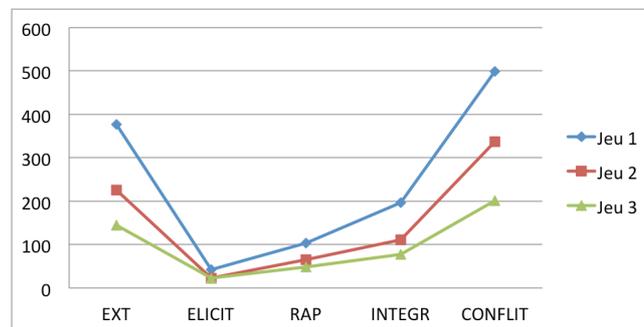


Figure 7. Nombre d'énonciations (total des groupes) par catégorie de modes sociaux de co-construction de connaissances pour les trois jeux

Les résultats n'indiquent pas de différence significative dans les modes sociaux de co-construction de connaissances mobilisés par les élèves pour résoudre les différents jeux. Du jeu 1 au jeu 3, l'externalisation et le consensus orienté par le conflit restent les deux modes mobilisés par les élèves pour collaborer de manière à résoudre les grilles des jeux.

La Figure 8 présente le pourcentage des verbalisations des élèves dans chaque catégorie des modes sociaux de co-construction de connaissances. Les résultats indiquent que 41.93% des verbalisations des élèves sont reliées à la construction d'un consensus par le conflit, 30.21% à l'externalisation, 15.53% à la construction d'un consensus par l'intégration, 8.77% à un consensus rapide et 3.56% à l'élicitation.

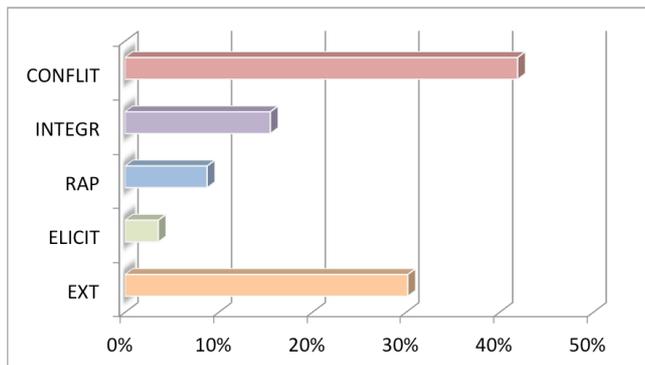


Figure 8. Pourcentage de verbalisations d'élèves dans chaque mode de co-construction de connaissances

DISCUSSION ET CONCLUSION

L'objectif de nos études était d'évaluer l'impact d'une TIT sur l'apprentissage des capacités de raisonnement spatial d'élèves en milieu écologique. Dans une première étude, nous avons comparé les résultats d'apprentissage de deux groupes d'élèves (Gr. Traditionnel vs. Gr. TIT). Les résultats du groupe TIT sont significativement supérieurs aux résultats du groupe ayant pratiqué le jeu dans son format traditionnel. Dans une seconde étude, nous avons analysé la participation des élèves (physique et verbale), leurs performances et la manière dont ils construisent leurs connaissances en groupe lorsqu'ils jouent au *Jeu des Tours* sur la TIT. Les résultats montrent (1) que les élèves passent approximativement un quart de leur temps à placer ou déplacer les tours sur la TIT pour trouver une solution à une grille du jeu, (2) que leur participation verbale représente 14.87 énonciations par minute en moyenne, (3) que leurs performances s'améliorent de manière significative entre le premier et le deuxième jeu mais pas après le second et, (4) qu'ils collaborent verbalement à travers l'externalisation et la recherche d'un consensus orienté par le conflit. Ces résultats sont discutés au regard du potentiel d'une TIT à favoriser l'apprentissage en classe.

Dans notre première étude, les résultats d'apprentissage du groupe d'élèves (6 à 7 ans) jouant sur la TIT sont significativement supérieurs aux résultats du groupe ayant pratiqué le jeu dans son format traditionnel (papier). Ces résultats attestent que les Tables Interactives avec objets Tangibles permettent l'apprentissages d'une tâche de raisonnement spatial, sans pour autant généraliser quant à la supériorité des performances des élèves sur TIT par rapport à celles obtenues sur papier. Do-Lenh *et al.* [7] n'ont pas trouvé de différence significative entre les résultats d'apprentissage d'un groupe d'étudiants (17 à 20 ans) apprenant de manière traditionnelle (papier), et d'un autre apprenant à l'aide d'une interface tangible. Comme le souligne Horn *et al.* [16], les bénéfices des TUI seraient plus avérés avec des enfants, ce qui pourrait expliquer les résultats de notre étude. De plus, la théorie Piagétienne du développement met en avant l'importance des manipulations concrètes d'objets tangibles dans le développement de la pensée en particulier chez les enfants [12]. Notre étude apporte ainsi des évidences empiriques aux bénéfices théoriques des interfaces tangibles présentés dans la littérature [29, 43].

Dans notre seconde étude, les élèves de CP passent un quart de leur temps sur la TIT à manipuler des objets tangibles dans le but de résoudre le problème posé par le jeu. Le développement de leurs capacités de raisonnement spatial pourrait être favorisé par ce niveau de participation physique et cognitive dans la résolution du problème. Cette étude révèle aussi que la participation verbale moyenne des élèves sur notre TIT à travers les trois jeux est de 14.87 énonciations par minute. Shaer *et al.* [34] ont comparé la participation verbale de huit étudiants dans trois conditions d'interaction différentes. L'interaction avec une GUI génère une moyenne de 6.63 énonciations par minute, l'interaction avec une GUI collaborative multi-souris 6.25 et, l'interaction avec une table interactive conduit à 7.25 énonciations par minute. Notre étude confirme et accentue cette tendance des TUI à favoriser la participation verbale des utilisateurs. Sur notre TIT, la participation verbale des élèves s'exprime majoritairement à travers des énonciations de type externalisation (plus de 30%) et des énonciations de type consensus orienté par le conflit (42%). Autrement dit, les élèves apprennent en collaborant par externalisation (*i.e.*, verbalisation adressée à un groupe sans aucune référence explicite ou implicite à une verbalisation précédente) et par consensus orienté par le conflit (*i.e.*, ne pas accepter les contributions de ses partenaires d'apprentissage). Johnson et Johnson [19] ont mis en avant le rôle du conflit dans l'apprentissage : « Le conflit est à l'apprentissage de l'élève ce que la combustion interne d'un moteur est à la voiture. (...) Tout comme l'essence et l'air sont inertes sans une étincelle, les idées dans la classe sont inertes sans l'étincelle du conflit intellectuel ». Les élèves de CP restent organisés autour de l'externalisation et du conflit pour résoudre un problème en groupe. L'enseignant s'avère ici indispensable pour permettre aux élèves de passer de ce mode initial de co-construction de connaissances à la recherche d'un consensus orienté par l'intégration (*i.e.*, les apprenants reprennent les perspectives de leurs partenaires d'apprentissage). Enfin, nos résultats indiquent que la performance des élèves sur la TIT s'améliore de manière significative entre le premier et le deuxième jeu mais pas après le second. Ce résultat suggère que la résolution du problème sur des grilles de 3x3 apparaît rapidement trop facile pour les élèves. Ces élèves de CP pourraient ainsi être capables de résoudre des grilles de 4x4 sur la TIT, un format de grille habituellement réservé aux élèves de cours moyens [40]. L'amélioration de leurs performances pourrait aussi être liée au fait que certains élèves développent leurs capacités de raisonnement spatial dès le premier jeu. Ils les partagent ensuite avec les autres dans les jeux suivants, passant ainsi d'une position d'élève au premier jeu à une position d'enseignant dans les jeux suivants. Cette hypothèse nécessite d'être explorée lors de futurs travaux.

LIMITES

Dans notre étude, les résultats d'apprentissage ont été uniquement mesurés à l'aide d'un test d'évaluation. Si elle constitue une première approche de l'évaluation des élèves dans cette situation, elle pourrait être associée à des dispositifs complémentaires (ex. entretiens).

Cependant, l'évaluation des apprentissages pour des élèves de 6 à 7 ans dans le milieu écologique de la classe constitue un challenge. En effet, l'âge et le niveau de développement des enfants limitent l'éventail des moyens d'évaluation. De plus, les contraintes du milieu écologique rendent difficiles le contrôle des conditions de l'évaluation et son exhaustivité.

Si la comparaison de la participation physique et verbale des élèves, la performance des groupes et les catégories de modes sociaux de co-construction de connaissances sont des pistes de recherche prometteuses, elles nécessitent de collecter et de traiter une base de données relativement conséquente que notre équipe n'était pas en mesure de réaliser en détails pour les deux groupes (Gr. Traditionnel et Gr. TIT). De plus, la nature écologique de nos études complexifie encore cette problématique de recueil de données auprès d'un grand nombre d'élèves. C'est pourquoi, nous avons privilégié uniquement l'analyse du groupe TIT dans l'étude 2. Une analyse complète (Gr. Traditionnel et Gr. TIT) fait partie de nos perspectives de recherche.

Par ailleurs, le déploiement en classe d'une TIT sur une courte durée, et pour la première fois, pourrait avoir impacté la motivation des élèves à pratiquer. Pour évaluer cet effet, nous envisageons à l'instar de Kharrufa *et al.* [21] de déployer la table *TangiSense 2* en classe sur une plus longue durée afin de mener des expérimentations complémentaires.

REMERCIEMENTS

Ce travail de recherche a été partiellement financé par le Ministère de l'Éducation nationale, de l'Enseignement supérieur et de la Recherche, le Conseil Général du Finistère, Brest Métropole et la ville de Brest. Nous voudrions remercier les étudiants de l'École Nationale d'Ingénieurs de Brest qui ont participé au développement du jeu sur la table interactive. Nous remercions aussi la circonscription Brest-Nord de l'Inspection Académique du Finistère. Enfin, nous tenons à remercier les écoles Paul Langevin et Paul Dukas de Brest mais aussi l'école Sainte Thérèse de Plouzané (directeurs, enseignants et personnels administratifs) ainsi que les parents et les enfants qui ont accepté de participer à cette étude.

BIBLIOGRAPHIE

1. Alibali M. W., diRusso A. A. (1999). The function of gesture in learning to count: More than keeping track. *Cognitive Development*, Vol. 14, p. 37-56.
2. Anastasiou, D., Maquil, V., & Ras, E. (2014). Gesture analysis in a case study with a tangible user interface for collaborative problem solving. *Journal on Multimodal User Interfaces*, 8(3), 305-317.
3. Block, F., Hammerman, J., Horn, M., Spiegel, A., Christiansen, J., Phillips, B., Diamond, J., Evans, E. M., and Shen, C. (2015). Fluid Grouping: Quantifying Group Engagement around Interactive Tabletop Exhibits in the Wild. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. ACM, New York, NY, USA, 867-876.
4. Burnett A. (1962). Montessori Education Today and Yesterday. *The Elementary School Journal*, Vol. 63(2), p. 71-77.
5. Cuendet, S., Bonnard, Q., Do-Lenh, S., & Dillenbourg, P. (2013). Designing augmented reality for the classroom. *Computers & Education*, 68, 557-569.
6. Dillenbourg, P., & Evans, M. (2011). Interactive tabletops in education. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, 6(4), 491-514.
7. Do-Lenh, S., Kaplan, F., Dillenbourg, P., 2009. Paper-based concept map: the effects of tabletop on an expressive collaborative learning task. In: *BCS-HCI '09: Proceedings of the 23rd British HCI Group Annual Conference on People and Computers: Celebrating People and Technology*. British Computer Society, Swinton, UK, pp. 149-158.
8. Edmans, J., Gladman, J., Walker, M., Sunderland, A., Porter, A., & Fraser, D. S. (2007). Mixed reality environments in stroke rehabilitation: development as rehabilitation tools. *International Journal on Disability and Human Development*, 6(1), 39-46.
9. Fiebrink, R., Morris, D., & Morris, M. R. (2009). Dynamic mapping of physical controls for tabletop groupware. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 471-480). ACM.
10. Fitzmaurice, G. W., & Buxton, W. (1997). An empirical evaluation of graspable user interfaces: towards specialized, space-multiplexed input. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems* (pp. 43-50). ACM.
11. Fitzmaurice, G. W., Ishii, H., & Buxton, W. A. (1995). Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems* (pp. 442-449). ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
12. Ginsburg, H.P & Opper, S. (1988). Piaget's theory of intellectual development. (3rd Ed.) Englewood Cliffs, NJ: *Prentice-Hall*.
13. Glover, D., Miller, D., Averis, D., Door, V., 2005. The interactive whiteboard: a literature survey. *Technology, Pedagogy and Education*, 14 (2), 155-170.
14. Harris A., Rick J., Bonnett V., Yuill N., Fleck R., Marshall P., Rogers Y. (2009). Around the table: are multiple-touch surfaces better than single-touch for children's collaborative interactions? In *Proceedings of the 9th international conference on Computer supported collaborative learning (CSCL '09)*, Claire O'Malley, Daniel Suthers, Peter Reimann, and Angelique Dimitracopoulou (Eds.), Vol. 1, International Society of the Learning Sciences, p. 335-344.

15. Higgins S., Mercier E., Burd E., Hatch A. (2011). Multi-touch tables and the relationship with collaborative classroom pedagogies: A synthetic review. In *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning*, Vol. 6(4), p. 515-538
16. Horn, M. S., Crouser, R. J., Bers, M. U. (2012). Tangible interaction and learning: the case for a hybrid approach. *Personal Ubiquitous Computing* 16(4), 379–389.
17. Ishii, H., & Ullmer, B. (1997). Tangible bits: towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems* (pp. 234-241). ACM.
18. Ishii, H., Mazalek, A., & Lee, J. (2001). Bottles as a minimal interface to access digital information. In *CHI'01 extended abstracts on Human factors in computing systems* (pp. 187-188). ACM.
19. Johnson, D. W., & Johnson, R. T. (2009). Energizing learning: The instructional power of conflict. *Educational Researcher*, 38(1), 37-51.
20. Kennewell, S., Tanner, H., Jones, S., Beauchamp, G., 2008. Analysing the use of interactive technology to implement interactive teaching. *Journal of Computer Assisted Learning*. 24 (1), 61–73.
21. Kharrufa, A., Balaam, M., Heslop, P., Leat, D., Dolan, P., and Olivier, P. (2013). Tables in the wild: lessons learned from a large-scale multi-tabletop deployment. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '13)*. ACM, New York, NY, USA, 1021-1030
22. Kharrufa, A., Martinez-Maldonado, R. Kay, J., and Olivier, P. (2013). Extending tabletop application design to the classroom. In *Proceedings of the 2013 ACM international conference on Interactive tabletops and surfaces (ITS '13)*. ACM, New York, NY, USA, 115-124.
23. Kubicki S., Pasco D., Arnaud I. (2014). Utilisation en classe d'un jeu sérieux sur table interactive avec objets tangibles pour favoriser l'activité des élèves : une évaluation comparative en cours préparatoire. *STICEF*, 21.
24. Kubicki, S., Lepreux, S., & Kolski, C. (2012). RFID-driven situation awareness on TangiSense, a table interacting with tangible objects. *Personal and Ubiquitous Computing*, 16(8), 1079-1094.
25. Kubicki, S., Pasco, D., Arnaud, I., (2015). Le "Jeu des Tours" : apprendre les Maths sur Table Interactive avec objets Tangibles, *Proceedings of 27ème conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine, IHM 2015*, October 2015, Toulouse, France, Pages d04, Actes annexes, BEST DEMO AWARD.
26. Lepreux S., Kubicki S., Kolski C., Caelen J. (2012). From Centralized interactive tabletops to Distributed surfaces: the Tangiget concept, *International Journal of Human-Computer Interaction*, Vol. 28, Issue 11, p. 709-721.
27. Manches, A., O'Malley, C., & Benford, S. (2009). Physical manipulation: evaluating the potential for tangible designs. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Tangible and Embedded Interaction* (pp. 77-84). ACM.
28. Marco, J., Cerezo, E., Baldassarri, S. (2013). Bringing tabletop technology to all: evaluating a tangible farm game with kindergarten and special needs children. *Personal and Ubiquitous Computing* 17(8): 1577-1591.
29. Marshall, P. (2007). Do tangible interfaces enhance learning? In: *TEI '07: Proceedings of the 1st international conference on Tangible and embedded interaction*. ACM Press, pp. 163–170.
30. Martinez-Maldonado, R., Clayphan, A., Kay, J. and Yacef, K. (2014) Towards Providing Notifications to Enhance Teacher's Awareness in the Classroom. *International Conference on Intelligent Tutoring Systems*, ITS 2014, 510-515.
31. Mendes, A., Backhouse, R., and Ferreira, J. F. 2014. Structure Editing of Handwritten Mathematics: Improving the Computer Support for the Computational Method. In *Proceedings of the Ninth ACM International Conference on Interactive Tabletops and Surfaces (ITS '14)*. ACM, NY, USA, 139-148.
32. Rick, J., Marshall, P., and Yuill, N. (2011). Beyond one-size-fits-all: how interactive tabletops support collaborative learning. In *Proc. of the 10th International Conference on Interaction Design and Children (IDC '11)*. ACM, NY, 109-117.
33. Shaer, O., & Hornecker, E. (2010). Tangible user interfaces: past, present, and future directions. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction*, 3(1–2), 1-137.
34. Shaer, O., Strait, M., Valdes, C., Feng, T., Lintz, M., & Wang, H. (2011). Enhancing genomic learning through tabletop interaction. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 2817-2826). ACM.
35. Shaer, O., Strait, M., Valdes, C., Wang, H., Feng, T., Lintz, M., Ferreirae, M., Grote, C., Tempel, K., Liu, S., (2012). The design, development, and deployment of a tabletop interface for collaborative exploration of genomic data. *International Journal of Human-Computer Studies* 70 (10), 746–764.
36. Shaer, O., Valdes, C., Liu, S., Lu, K., Chang, K., Xu., Haddock, T., Bhatia, S., Densmore, D., Kincaid, R. (2014). Designing reality-based interfaces for experiential bio-design. *Personal and Ubiquitous Computing* 18(6): 1515-1532.

37. Shneiderman, B. (1993). 1.1 direct manipulation: a step beyond programming languages. *Sparks of innovation in human-computer interaction*, 17, 1993.
38. Sluis, R. J. W., Weevers, I., van Schijndel, C. H. G. J., Kolos-Mazuryk, L., Fitriani, S., Martens, J. B. O. S., (2004). Read-It: five-to-seven-year-old children learn to read in a tabletop environment. In: *IDC '04: Proceedings of the 2004 conference on Interaction design and children: building a community*. ACM Press, pp. 73–80.
39. Soute, I., Kaptein, M., Markopoulos, P. (2009). Evaluating outdoor play for children: virtual vs. tangible game objects in pervasive games. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Interaction Design and Children*. IDC '09. ACM, New York, NY, USA, pp. 250–253.
40. Valentin D. (2004) Découvrir le monde avec les mathématiques, Hatier.
41. Weinberger, A., & Fischer, F. (2006). A framework to analyze argumentative knowledge construction in computer-supported collaborative learning. *Computers & Education*, 46, 71-95.
42. Xie, L., Antle, A. N., Motamedi, N., 2008. Are tangibles more fun?: comparing children's enjoyment and engagement using physical, graphical and tangible user interfaces. In: *TEI '08: Proceedings of the 2nd international conference on Tangible and embedded interaction*. ACM Press, pp. 191–198.
43. Zuckerman O., Gal-Oz A. (2013). To TUI or not to TUI: Evaluating performance and preference in tangible vs. graphical user interfaces, *International Journal of Human-Computer Studies*, Volume 71, Issues 7–8, July–August 2013, Pages 803-820, ISSN 1071-5819.
44. Zuckerman, O., Arida, S., & Resnick, M. (2005). Extending tangible interfaces for education: Digital Montessori-inspired manipulatives. In: *Proceedings of SIGCHI conference on human factors in computing systems*, 859-868.