



HAL
open science

“ Teegi, il est trop beau ”: Exemple d’évaluation du potentiel pédagogique d’une interface tangible interactive pour enfants en contexte scolaire

Stéphanie Fleck, Charlotte Baraudon, Jérémy Frey, Thibault Lainé, Martin Hachet

► To cite this version:

Stéphanie Fleck, Charlotte Baraudon, Jérémy Frey, Thibault Lainé, Martin Hachet. “ Teegi, il est trop beau ”: Exemple d’évaluation du potentiel pédagogique d’une interface tangible interactive pour enfants en contexte scolaire. 29ème conférence francophone sur l’Interaction Homme-Machine, AFIHM, Aug 2017, Poitiers, France. 10.1145/3132129.3132143 . hal-01578637

HAL Id: hal-01578637

<https://hal.science/hal-01578637>

Submitted on 29 Aug 2017

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.

« Teegi, il est trop beau »: Exemple d'évaluation du potentiel pédagogique d'une interface tangible interactive pour enfants en contexte scolaire

“Teegi, He’s so cute”: Example of pedagogical potential testing of an interactive tangible interface for children at school

Stéphanie Fleck
Université de Lorraine / PERSEUS
EA 7312, Île du Saulcy CS 60228
Metz, 57045 Cedex 1, France
stephanie.fleck@univ-lorraine.fr

Charlotte Baraudon
Canopé 57
16 Rue de la Victoire,
57950 Montigny Les Metz, France
charlotte.baraudon@reseau-canope.fr

Jérémy Frey
Ullo
40 rue Chef de Baie
17000 La Rochelle
jfrey@ullo.fr

Thibault Lainé
Inria Bordeaux
200 rue de la vieille tour
33405, Talence, France
thibault.laine@inria.fr

Martin Hachet
Inria Bordeaux
200 rue de la vieille tour
33405, Talence, France
martin.hachet@inria.fr



Figure 1: Teegi entouré des élèves participants de l'étude.

ABSTRACT

The cerebral activity is an intangible physiological process difficult to apprehend, especially for children. With the aim of providing a new type of educational support, we studied the pedagogical potential of an interactive tangible interface (Teegi) designed to be used in educational context. This interface aims at enabling children to discover the relation between the brain activity and the human body functions. We propose in this study a methodology to evaluate its pedagogical potential in real context of use, considering the specificities of the children. This study, carried out with 29 pupils, highlights

the strengths of this system, both in terms of its usability and its impact on learning. Moreover, the results provided by this methodology revealed possible improvements for a greater pedagogical effectiveness. This type of interactive interface, as well as the evaluation method proposed, paves the way for the pedagogical use of new interactive and tangible devices at school.

CCS CONCEPTS

• **Human-centered computing** → *HCI design and evaluation methods*; • **Applied computing** → *Interactive learning environments*

KEYWORDS

Tangible interface, Education, Child-Computer Interaction, Usability testing, Educative potential, School context.

RÉSUMÉ

L'activité cérébrale est un processus physiologique intangible qui peut être difficile à appréhender, notamment pour des enfants. Pour répondre aux besoins en supports pédagogiques et favoriser les apprentissages liés à ce type de concepts, nous étudions le potentiel d'une interface tangible interactive dédiée

© ACM, 2017. This is the author's version of the work. It is posted here by permission of ACM for your personal use. Not for redistribution. The definitive version was published in Actes de la 29ème conférence francophone sur l'Interaction Homme- Machine, IHM'17, August 28–September 1, 2017, Poitiers, France
<https://doi.org/10.1145/3132129.3132143>

à la visualisation d'activités cérébrales (Teegi) en contexte éducatif. Nous proposons une méthodologie d'évaluation du potentiel pédagogique en contexte réel d'utilisation par des enfants. Cette étude réalisée avec 29 enfants, met en évidence les forces de ce système, tant au niveau de son utilisabilité que de ses impacts sur les apprentissages visés. Les résultats obtenus mettent en lumière des axes d'améliorations possibles pour une plus grande efficacité pédagogique. Ce type d'interface, ainsi que la méthode d'évaluation que nous proposons, ouvrent la voie de l'utilisation pédagogique de nouveaux dispositifs interactifs et tangibles en milieu scolaire.

MOTS-CLEFS

Interface tangible, Education, Interaction enfant-machine, Evaluation de l'utilisabilité, Potentiel pédagogique, Contexte scolaire.

1 INTRODUCTION

Initiée par Papert [35], l'Interaction Homme-Machine (IHM) pour enfants est un secteur en expansion depuis 25 ans. Le design d'interfaces tangibles (ou *Tangible User Interface* - TUI) spécifiées pour les enfants est cependant lui très récent et ouvre des perspectives fortes dans les domaines de l'éducation formelle et informelle [7; 16; 21; 57; 60]. De nombreuses synthèses de travaux mettent ainsi en avant les potentialités des TUIs pour l'amélioration des apprentissages (e.g. possibilités de manipulations physiques, collaboratives et plus-values numériques – voir par exemple [5; 9; 19; 29; 45; 46; 63]). Malheureusement, l'essentiel des travaux est centré sur la conception des interfaces (impliquant ou non les enfants eux-mêmes). Les études relatant leurs évaluations du point de vue de l'utilisabilité par des enfants¹ et de leur pertinence vis à vis des apprentissages restent trop peu nombreuses, souvent mono-utilisateur et surtout insuffisamment décrites [61; 62].

Bien que ce type d'interface porte un potentiel d'innovation évident, la question de leur pertinence pédagogique en contexte réel d'usage n'est quasiment jamais abordée. Ce type d'études, car très complexes à mettre en œuvre, reste très marginal [23; 44] et les outils d'évaluation classiques des IHM, notamment via des questionnaires, trouvent souvent ici leurs limites. Au travers d'une approche pluridisciplinaire, croisant IHM et sciences de l'éducation, notre objectif est de contribuer à augmenter le corpus d'études de cas exposant l'évaluation d'Interfaces/interactions Enfant-Machine (*Children-Computer Interaction*, CCI) à visée éducative.

Nous nous intéressons ici à l'évaluation d'un dispositif interactif tangible correspondant à une évolution de Teegi [12] : un personnage physique, aisément manipulable, et conçu pour permettre à des utilisateurs de visualiser leur propre activité cérébrale devant eux. Il vise à rendre tangibles (i.e. dont la réalité est indéniable) et explorables des fonctions physiologiques qui restent le plus souvent difficilement compréhensibles. Les premières expérimentations menées en laboratoire ont mis en évidence des qualités pédagogiques auprès d'un public adulte [17]. Dans cet article, nous cherchons à explorer la pertinence d'une telle approche pour un public d'enfants. Pour cela, nous nous appuyons sur la nouvelle

version de Teegi « *standalone* » pensée pour rendre plus facilement accessible à un large public des notions simples du fonctionnement cérébral [13]. Cette nouvelle version vise plus précisément la découverte de la structuration cérébrale et de la présence de zones « dédiées » à des fonctions spécifiques que sont la vue et la motricité des mains et des pieds.

Dans la suite de ce papier, après avoir rappelé brièvement le mode de fonctionnement de la nouvelle version de Teegi et les besoins auxquels elle répond, nous étudions si ce dispositif interactif serait adapté à des enfants du point de vue de son potentiel pédagogique pour pouvoir être utilisé dans le cadre d'un apprentissage formel (i.e. en contexte scolaire) ou informel (i.e. en musée, Centre de médiation de la Culture Scientifique, Technique et Industrielle). L'originalité de l'approche proposée réside ici en

- i) la conception de l'étude utilisateurs-apprenants conduite en contexte réel d'usage,
- ii) l'intégration d'outils d'évaluation issus des sciences de l'éducation pour estimer, au-delà de l'utilisabilité et de la désirabilité, l'impact de l'utilisation d'une TUI sur les apprentissages et le désir d'apprendre, et ainsi tenter de compléter les outils classiques de mesure des IHM en contexte scolaire.

2 ÉTAT DES LIEUX

2.1. Contextualisation des besoins pédagogiques

Depuis le lancement en France du Plan national « Le Cerveau et les maladies du système nerveux » en 2006, de nombreuses campagnes de sensibilisation pour favoriser la découverte et la compréhension du fonctionnement cérébral se sont mises en place auprès du grand public (e.g. la semaine du Cerveau coordonnée par la société de Neurosciences) ainsi qu'en contexte scolaire (e.g. dispositif la main à la pâte « Les écrans, le cerveau...et les enfants »; [36]). Or, du fait du manque de supports faciles d'accès et pédagogiques, le fonctionnement du cerveau reste peu voire pas enseigné.

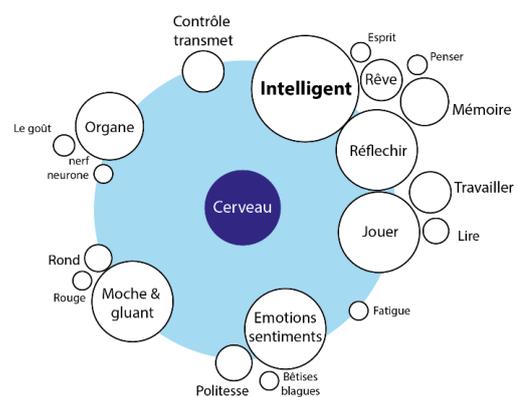


Figure 2 : Cartographie des représentations initiales des enfants sujets de l'étude, en lien avec la question posée en pré-test : « Quels sont les 5 mots qui te viennent à l'esprit quand on te dit le mot cerveau ».

¹ Le terme enfant correspond ici à la tranche d'âge des 7/11 ans ; on parle de jeune enfant pour les 3/6 ans et d'adolescent pour les 12 ans et plus.

Par conséquent, bien que le cerveau fasse partie des organes que les enfants citent spontanément parmi ceux du corps humain (avec les os, le cœur ou l'estomac), cela reste l'un des organes dont le fonctionnement est le plus mal connu [33].

Leurs représentations témoignent d'une vision naïve, très parcellaire vis-à-vis des aspects biologiques ou fonctionnels, comme en témoignent les représentations initiales exprimées par les enfants au cours de cette étude (voir Fig.2).

Il est ici vu uniquement comme le siège de l'intelligence ou des émotions. La structuration cérébrale et des fonctions telles que les fonctions motrices ou sensorielles sont peu ou pas connues.

De plus, l'apprentissage des fonctions physiologiques représente une réelle difficulté pour un enfant car non perceptibles sensoriellement et donc intangibles [53]. Les enfants n'ayant pas atteint le stade des opérations formelles (i.e. stade qui permet aux apprenants de traiter des opérations abstraites [39; 40]), ils ont fortement besoin d'ancrages physiques, concrets, et visuels pour construire leurs connaissances.

Proposer un modèle en trois dimensions, réaliste et attractif, offrant des possibilités d'interactions, facilitant l'observation et les manipulations semble un atout vis à vis de ce public dans le domaine de la physiologie [32]. Or, ce sont des avantages intrinsèques des TUIs. Aussi, un support de nouvelle génération tel que Teegi pourrait répondre de façon pertinente aux réels besoins en matière de support pédagogique.

2.2 Les interfaces tangibles et le fonctionnement cérébral.

Une branche de l'informatique s'intéresse aux phénomènes physiologiques [8], cependant la grande majorité des applications se focalise sur l'utilisation de ces signaux comme nouvelles entrées pour de l'IHM. Il en va ainsi pour le champ des interfaces cerveau ordinateur (ICO), où l'activité cérébrale est étudiée afin de suppléer à la commande d'ordinateurs, sans avoir recours à l'utilisation d'aucun muscle [59]. Cependant, au-delà des outils permettant aux étudiants en médecine et aux spécialistes de se représenter les organes internes à l'aide de techniques d'imagerie comme l'échographie, l'IRM (imagerie par résonance magnétique) ou bien encore l'EEG (électroencéphalographie), peu d'interfaces sont destinées à des novices et/ou à l'étude du corps en fonctionnement. Ainsi, l'interface tangible développée par Panchaphongsaphak et al. [34] – combinant une maquette de cerveau et un affichage de type réalité virtuelle – ou la visualisation en réalité augmentée d'activité EEG conçue par Mercier-Ganady et al. [31] restent peu accessibles au grand public, et encore moins aux enfants. Uğur [52] et Williams et al. [58] ont utilisé des *wearables* et de l'actuation afin de présenter des signaux physiologiques de manière intuitive, cependant l'information ainsi affichée avait trait à l'expression des sentiments et était peu explicite en tant que telle. De rares interfaces tangibles sont destinées à la médiation scientifique ou à l'introspection (e.g. [15; 32]), mais à notre connaissance aucune interface autre que Teegi n'est dédiée à l'explication de phénomènes liés au cerveau en fonctionnement.

3 TEEGI

Teegi est un personnage physique sur lequel les aires cérébrales impliquées dans les mouvements des mains et des pieds et dans la vision sont mises en évidence. Pour ce faire, la première itération de Teegi [12] reposait sur l'affichage en temps réel de l'activité cérébrale, recueillie au moyen d'un EEG. La seconde version de Teegi [13] inclut des éléments interactifs permettant à l'utilisateur de le manipuler directement afin d'apprendre sur le fonctionnement du cerveau, sans nécessairement avoir besoin d'être relié à un système de mesure d'activité cérébrale. C'est cette version (Fig. 3) que nous avons évaluée en situation d'apprentissage avec des enfants de cycle 3 (8 à 11 ans). Teegi fonctionne de manière autonome, sans connexion avec un appareil externe. Teegi met en lumière les aires cérébrales liées au mouvement des mains et des pieds ainsi que celle liée à la vision. Afin des déclencher les différentes visualisations, l'utilisateur manipule directement les mains et les pieds de Teegi, ou bien lui ferme les yeux [18].

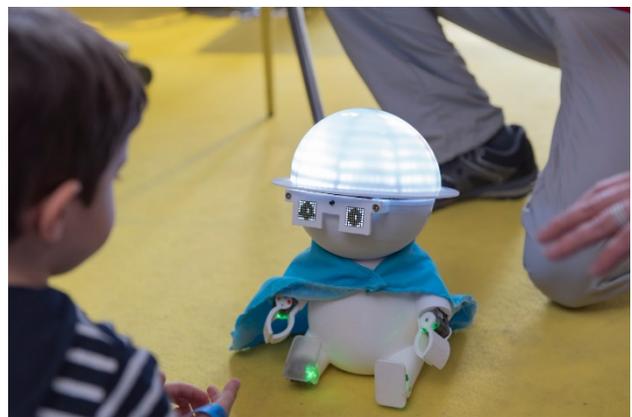


Figure 3 : TEEGI

Son corps, imprimé en 3D, contient une carte Raspberry Pi3 afin de contrôler l'affichage et les interacteurs, ainsi que des batteries de type NiMH assurant une autonomie d'environ 2h. Sa tête est un affichage semi-sphérique composé de 402 diodes électroluminescentes couleur (LED - Adafruit Neopixels). Leur lumière est diffusée à l'aide du « casque » de Teegi, une coque de 3mm d'épaisseur en plexiglas. Deux matrices de 8x8 DELs blanches représentent les yeux de Teegi. Un bouton situé en leur milieu permet de "fermer" les yeux de Teegi. Cette action provoque l'affichage d'une zone colorée à l'arrière de la tête de Teegi correspondant à l'aire occipitale chez l'humain, où se situe le cortex visuel primaire. Cela reflète en effet la modification importante d'activité qui survient lorsque les yeux ne sont plus sollicités, les neurones se «synchronisant» alors faute de stimulations. Les mains et les pieds sont reliés à des servomoteurs (Dynamixel XL320). Ils peuvent fonctionner selon deux modes : asservi ou non. Le mode asservi permet à Teegi de bouger ses membres sans intervention externe ; il a été ici utilisé en début de scénario afin de présenter les interactions possibles aux enfants. Le mode non asservi, mode par défaut, permet aux utilisateurs de découvrir quelles aires cérébrales sont liées aux différents membres en manipulant Teegi. Ainsi, bouger la main gauche colore une zone située "au milieu à droite" de la tête de Teegi, ce qui correspond chez

l'humain à l'aire pariétale et au cortex moteur primaire. Bouger la main droite se traduira par un changement dans la zone opposée, les hémisphères cérébraux contrôlant les zones motrices de la partie controlatérale du corps. Enfin, manipuler les pieds de Teegi permet de mettre en lumière le "somet" de sa tête, à l'image de l'organisation somatotopique du cortex moteur primaire [37]. Ainsi, l'interaction avec Teegi permet de traduire certains concepts non triviaux venant des neurosciences.

4 MOYENS ET MÉTHODES

Selon les principes du design pédagogique [14; 48], favoriser des apprentissages de qualité demande notamment que les supports proposés aux apprenants soient :

- i) utilisables et attractifs,
- ii) rendent effectifs les apprentissages visés,
- iii) permettent à l'apprenant d'identifier les savoirs visés (i.e. on peut avoir appris quelque chose mais ne pas être en mesure de l'identifier),
- iv) stimulent la motivation scolaire (i.e. motivent les apprenants non seulement à utiliser l'interface, mais aussi à apprendre).

4 facteurs dépendants du contexte d'usage. De plus, pour estimer l'impact sur les apprentissages formels d'une interface, il convient d'envisager l'enfant-utilisateur comme un apprenant et non comme un testeur. Aussi, nous avons choisi de conduire les évaluations en contexte réel, ce que Cuendet, et al. [5] appellent le contexte écologique scolaire. Cela pour permettre à l'enfant d'être pleinement dans son statut d'élève et d'être au plus proche d'une situation d'usage pédagogique classique.

Or, estimer en contexte réel d'usage l'efficacité d'un environnement informatique est extrêmement complexe. Les contraintes sont notamment :

- organisationnelles et méthodologiques pour maintenir un degré de contrôle suffisant, tel qu'en laboratoire, demandent entre autre la mobilisation d'une ou plusieurs

classes, de chercher à contrôler au maximum des réalités écologiques variables (e.g. effet maître, climat de la classe, hétérogénéité des publics etc.) ou institutionnelles (e.g. respects des rythmes scolaires, des programmes, des règles déontologiques telles que permettre à chacun l'accès au savoir de façon équitable).

- la disponibilité de supports dits traditionnels. Ainsi, au-delà de la complexité précédente, l'absence de supports pédagogiques qui mobiliseraient le même type de contenus, mais aussi de tâches, induit qu'il n'est pas toujours possible de mettre en place une approche comparative par rapport à une approche dite « classique ». Dans notre cas, tel qu'indiqué précédemment, l'enseignement du cerveau en fonctionnement n'est que très rarement mis en œuvre et les supports sont lacunaires.

Dans ce type de contexte, nous nous positionnons sur l'estimation d'un potentiel pédagogique plutôt que sur la mesure d'une efficacité absolue. De plus, pour chercher à pallier ces difficultés et dans la continuité des travaux incitant à adopter des méthodes mixtes (e.g. [41; 50]), nous proposons la combinaison de méthodes issues du domaine des IHM et ceux des sciences de l'éducation pour obtenir des observations croisées permettant d'estimer l'impact de Teegi sur les 4 facteurs favorables à l'apprentissage cités ci-dessus.

4.1 Contexte de l'étude et participants

Nous avons ainsi testé trois hypothèses de recherche complémentaires pour estimer le potentiel pédagogique de Teegi en contexte formel d'éducation:

H1 : L'utilisabilité de Teegi est adaptée à des enfants, ici de 8 à 11 ans.

H2 : Teegi favorise les premiers apprentissages de la structuration cérébrale et l'identification de zones « dédiées » à des fonctions spécifiques que sont la motricité des 4 membres et la vue.

H3 : Ce support tangible possède des qualités pédagogiques permettant une entrée positive dans les apprentissages sur le fonctionnement cérébral.

Table 1 : Description de la population ayant participé à la session de test avec Teegi en contexte réel d'usage

Heure de passage	Description du panel						Apprentissages		Type de comportements d'utilisation de Teegi observables			
	Groupe	Age moyen	nbr d'élèves/Gr	situations de handicap	Filles	Garçons	Lien de cause à effet	Connaissance des aires activées post-test	Joue	S'approprie	Apprend	Temps de manip. de Teegi
9h00	A	9,7	3	-	3	0	1	2	0	12,96	70,93	32,76
9h15	B	9,3	3	-	2	1	2	1	0	19,48	63,43	29,92
9h30	C	9,3	3	-	1	2	2	1	0	19,69	79,24	40,75
9h45	D	9,7	3	-	2	1	3	2	0	10,64	82,11	27,67
10h30	E	9,3	3	1	1	2	1	2		23,41	72,53	15,29
10h45	F	11,3	3	3	3	0	0	1	0	15,79	67,27	29,62
11h00	G	9,5	5	-	3	2	2	3	0	33,68	60,44	47,68
11h15	H	9,7	6	-	2	4	0	4	2,80	17,14	62,28	66,31
Total	8	9,7 (std =0,85)	29	4	17	12	11	16	0,40	19,10	69,78	39,3

Conduire les tests utilisateurs en conditions réelles d'usage contrôlées a demandé l'organisation d'une demi-journée de sortie scolaire sur le thème "Codage et Robotique" ; thème volontairement différent de la notion visée *via* Teegi pour ne pas biaiser les évaluations. Cette animation s'est déroulée au sein du living lab de l'atelier Canopé 57. L'installation du lieu et le scénario pédagogiques ont été conçus de la même façon que des sessions de découverte scientifique telles que menées en classe lors de séances de sciences [43] ou en centres de médiation de la culture scientifique et technique. Dans ces contextes éducatifs les élèves évoluent généralement sur des ateliers de courtes durées (15 à 30 minutes en moyenne) et en groupes.

Cette journée a été conçue et menée en collaboration avec des étudiants en Master Métier de l'Enseignement, de l'Éducation, et de la Formation parcours « Ingénierie Pédagogique » (Master MEEF-IP) de l'Université de Lorraine. Trois ateliers tournants ont été proposés aux élèves, incluant un temps d'atelier de 30 minutes avec Teegi en groupes de 3 ou 5/6 élèves. Les enfants de la classe de Cycle 3 participante constituaient un groupe de 29 élèves, d'âge moyen 9.71 ans (STD 0.85), 17 étaient des filles et 12 des garçons (Table 1). Parmi les élèves, 3 jeunes filles sont en situation de déficience cognitive de degrés différents. En retard scolaire de 1 à 3 ans, elles présentent notamment des difficultés variables de compréhension des consignes et d'écriture. L'un des garçons présente des troubles de type déficit de l'attention/hyperactivité mais sans nécessiter d'adaptation pédagogique au-delà de la présence de son assistante de vie scolaire à ses côtés.

Au-delà du scénario pédagogique, cette animation pédagogique incluant les sessions de tests utilisateurs a demandé d'être attentif aux contraintes institutionnelles comme :

- respecter les temps scolaires ne pouvant excéder un total de 2h30 du fait des horaires de classe, du respect des pauses récréative/d'hygiène, etc.
- permettre à tous de vivre tous les temps de la demi-journée. Une vigilance particulière a été portée pour inclure les élèves porteurs de handicap, pour constituer des groupes de niveaux en lien avec l'enseignant mais hétérogènes en genres. Seuls deux groupes restent ici exclusivement féminins (voir Table 1);
- être en accord avec les nouveaux programmes scolaires [10; 11] du Cycle 3.

4.2 Modalités d'évaluation

Le choix des questionnaires et modalités d'évaluation ont également fait l'objet d'une attention particulière car les tests d'évaluation de l'expérience utilisateur et de l'utilisabilité des interfaces les plus classiques tel le *Standard Usability Scale* [51] sont pour la plupart non adaptés à des enfants ou aux interfaces tangibles. Les méthodes d'évaluation par questionnaire classiquement utilisées, elles-mêmes parfois discutées [20], trouvent des limites face à ce public [26; 28]. Au-delà de leur caractère subjectif, leur principal problème provient de la complexité de la formulation des consignes et du vocabulaire spécialisé utilisé (e.g. les termes « fréquemment », « système » ; « fonctions » ou « incohérence » ne sont pas compréhensibles de tous les élèves de cycle 3). Les enfants, ayant un spectre de

vocabulaire plus limité qu'un adulte et des expériences moindres, ils peuvent rencontrer des difficultés pour qualifier et exprimer leurs représentations ou perceptions.

Pour limiter cet obstacle et estimer les facteurs favorables à l'apprentissage, nous avons fait le choix de :

- i) recueillir les perceptions et les représentations des utilisateurs-apprenants en couplant les recueils de façon verbale, écrite et scripturale pour multiplier les modes d'accès à ces dernières ;
- ii) diversifier les moyens d'enquêtes et d'observation assistée par la vidéo pour pouvoir croiser des données d'utilisabilité et pédagogiques permettant d'affiner la compréhension de l'impact d'une interface sur les 4 facteurs favorables aux apprentissages ;
- iii) sélectionner des tests issus des domaines des IHM et des sciences de l'éducation que nous pensons adaptés à nos hypothèses et aux enfants.

Les modalités d'évaluation choisies sont donc :

- le test des 5 secondes (ou *Rapid Desirability Testing* [18]) au travers de la question « *Voilà Teegi, comment tu le trouves ?* ». L'objectif est ici de recueillir verbalement les toutes premières perceptions et impressions vis à vis du système générées par l'esthétique, c'est à dire la sensibilité aux caractéristiques physiques, au visuel et aux formes du système. C'est l'effet de halo et de désirabilité provoqué par le système qui est ici spécifiquement recherché (e.g. [47; 49]).
- le questionnaire Attrakdiff [17]. Il a été choisi pour évaluer l'utilisabilité et l'attractivité de l'interface. Validé dans sa version française avec des sujets adultes, il est dans sa version complète composée de 28 items [24]. Ce test est ici utilisé dans sa version dite simplifiée, composé de 10 items simples. Il est choisi ici pour estimer la perception des attributs pragmatiques (4 items), hédonistes (4 items), et l'attractivité globale (2 items) de l'interface au travers d'une échelle de discrimination sémantique en 7 points. Une question demandant si les enfants ont jugé Teegi motivant ou décourageant y a été ajoutée. Ce questionnaire de 11 items avait été pré-testé lors d'une étude en contexte scolaire et s'est avéré compréhensible des élèves [4]. 28 questionnaires sur les 29 attendus ont été exploitables, un élève n'ayant pas terminé de répondre à l'ensemble des questions.
- En complément du questionnaire précédent issu du domaine de l'ergonomie des IHM, le test de la valeur motivationnelle d'une activité pédagogique a été également utilisé. Ce test conçu par Viau [54] pour évaluer des situations pédagogiques sans interfaces numériques, a été utilisé ici sans sa dernière question jugée trop complexe pour les enfants. Ce questionnaire, dont les questions sont formulées pour être accessibles à des enfants, est basé sur une échelle de Likert en 4 points portant sur les critères classiques liés à la motivation dite extrinsèque selon le modèle de la dynamique motivationnelle [56] (i.e. une activité claire, diversifiée, signifiante, rendant l'enfant responsable, représentant un défi, exigeant un engagement cognitif, permettant de collaborer, ayant une durée suffisante et ayant un caractère authentique). L'objectif est ici d'évaluer les leviers motivationnels de l'activité pédagogique menée avec Teegi. Les 29 questionnaires ont été exploités.
- Un recueil des représentations des élèves par le dessin en pré- et en post-tests a été mené. Le recueil des conceptions des élèves, notamment par voie graphique, est une méthode classique dans l'enseignement des sciences basé

sur le changement conceptuel [1; 2] ; un apprentissage entraînant la modification du concept préexistant et donc sa représentation. L'objectif est ici d'estimer l'impact de Teegi sur les apprentissages visés (28 tests sur 29 exploitables).

- De plus, en cours de la session de découverte les enfants devaient renseigner des fiches d'observation permettant de recueillir par le dessin s'ils avaient chacun correctement perçu les zones interactives du système et la nature de ses observations. Une question ouverte était également posée « *Plus précisément que se produit-il ?* » pour estimer le niveau de perception du lien de cause à effet produit par ses manipulations sur le système. Il faut noter que, pour tous les tests, les élèves n'étaient pas obligés de répondre aux questions écrites notamment pour ne pas mettre en difficulté les élèves complexés vis à vis de leur maîtrise du français écrit. Dans le cas de cette question 9 élèves sur les 29 n'ont pas répondu.
- Un retour subjectif d'expérience a posteriori a été demandé au travers de deux questions ouvertes posées à l'écrit dans le post-test : « *Qu'est-ce que Teegi permet d'apprendre ?* » (23 répondants sur 29 élèves) et « *Quelles sont tes remarques sur Teegi ?* » (25 répondants sur 29 élèves). Une analyse de similitude lexicale des textes produits (48 textes d'en moyenne 5 lignes) a été effectuée via IRaMuTeQ [42] dans le but de cerner ce qui est perçu par les enfants vis à vis de ce qu'incarne Teegi notamment du point de vue des objectifs d'apprentissage.

Enfin, dans le but de les croiser avec l'activité effectivement engagée par les enfants avec Teegi, ces données déclaratives ont été doublées de l'analyse des comportements d'utilisation et d'apprentissage. L'analyse assistée par la vidéo, effectuée via The Observer XT 14 (Noldus, Info Tech, Wageningen, The Netherlands), est basée sur une grille d'analyse comportementale constituée de 3 classes :

- a) typologie des interactions physiques avec l'interface (e.g. bouge/touche les mains, les pieds, le corps, soulève, tourne ...Teegi)
- b) implication dans la tâche (durée, nombre de moments de décrochage, nombre de demandes d'aide...);
- c) typologie de l'activité conduite (e.g. observe, indique, manipule pour vérifier, échange verbalement, aide un camarade, joue, manipule sans but...).

4.3 Description de la session de test



Figure 4: Exemple session de test en groupe de 3 enfants (Groupe E) illustrant la position des enfants, de Teegi et du système de captation dans l'espace du living lab.

Une semaine avant la session de test utilisateur au living lab, les élèves ont renseigné les pré-tests sur leurs représentations du cerveau. Le jour de la session, durant un accueil de 10 minutes, Teegi a été présenté à l'ensemble de la classe comme un robot à manipuler avec délicatesse. Dans une première partie

de matinée, six groupes de trois élèves ont interagi avec Teegi, dont un groupe constitué des trois jeunes filles en situation de handicap (Groupe F) pour qui l'accompagnement et les consignes ont été adaptées. Dans la seconde partie de la matinée, deux groupes, respectivement de cinq et six enfants, ont découvert Teegi (Table 1). Cela a permis aux 29 enfants de la classe d'utiliser Teegi dans un créneau total de deux heures; une demi-heure de récréation étant obligatoirement à prévoir. L'enregistrement audiovisuel s'est fait via deux caméras GoPro placées sur pieds dans les angles de l'espace. Teegi est posé au centre d'une table classique dans un espace séparé des autres espaces et dépourvu d'éléments pouvant perturber l'attention des élèves. Les petits groupes d'élèves se trouvent placés debout directement devant la table en entrant dans l'espace (Fig.4).

Toutes les sessions de test se sont déroulées selon le même scénario. Chaque session débute par le test des 5 secondes. Puis les 5 premières minutes d'exploration se sont faites accompagnées de l'expérimentatrice pour i) présenter rapidement le fonctionnement mécanique du système notamment *via* le mode asservi, ii) répondre aux éventuelles questions des enfants, iii) présenter les fiches d'observation permettant de recueillir leurs résultats d'investigation avec Teegi. L'objectif d'apprentissage ne leur a jamais été indiqué. Puis, les enfants de chaque groupe ont pu librement faire les observations, manipulations de leur choix et remplir les fiches d'observation pendant 10 à 12 minutes. L'expérimentatrice a dû cependant rester en permanence dans la pièce ; la présence d'un adulte étant obligatoire pour garantir la sécurité des élèves. Restée néanmoins en retrait, elle a répondu aux éventuelles questions techniques des élèves lorsque cela était nécessaire mais n'est pas intervenue en dehors de cela. A l'issue des 15 minutes, un nouveau groupe est invité à faire les tests utilisateurs. Les enfants du groupe précédent vont alors renseigner les questionnaires Attrakdiff et de motivation, et ce accompagnés par des étudiants du Master MEEF-IP. Les enfants placés dans un autre espace, sont assis à distance et de telle façon qu'ils ne puissent voir les réponses de leurs camarades. Les élèves en situation de handicap sont ici plus accompagnés et donnent leurs réponses de façon dictée à l'adulte. Enfin, les post-tests ont été complétés au cours de l'après-midi, en classe, plus de 2 heures après la fin de la session de test, après le repas et un temps de détente, pour estimer les apprentissages fixés à courts termes.

5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Utilisabilité de l'interface

5.1.1 Opérabilité. L'analyse des comportements observables via les captations vidéo indique que l'appropriation de Teegi par les enfants a été relativement rapide. Ainsi, en dehors du temps passé avec l'expérimentatrice, au cours duquel les enfants ont pris le temps d'explorer le fonctionnement de l'interface (ce qui représente moins de 20% du temps total de la session - Table 1), les enfants n'ont pas eu besoin de temps d'apprentissage supplémentaire pour comprendre l'usage de Teegi. Les enfants n'ont jamais demandé d'aide en dehors de la nécessité de changement de batterie et pour refixer une main (Groupe F et H). Teegi a donc été facile d'appropriation, utilisable par les enfants sujets de cette étude et relativement fiable. De plus, durant les sessions, les enfants ont une attitude plutôt positive

(i.e. sourire, rire, surprise) et précautionneuse vis à vis de l'interface, sans jamais montrer d'exaspération ou de lassitude. Ceci indique que l'usage de Teegi dans les conditions décrites n'a semblé ni fatigant, ni stressant.

5.1.2 *Typologie d'utilisation.* Les comportements des enfants ont été classés en trois catégories selon la nomenclature proposée par Markopoulos et al. [27]:

1. joueur (e.g. l'enfant chatouille Teegi, mime des jeux de poupée/robot),
2. appropriation/utilisateur (e.g. l'enfant tourne Teegi rapidement, l'inspecte, l'enfant interagit pour comprendre le fonctionnement sans but d'apprentissage apparent),
3. apprenant (e.g. l'enfant manipule, cherche pour comprendre, vérifie quelque chose, observe les conséquences des manipulations).

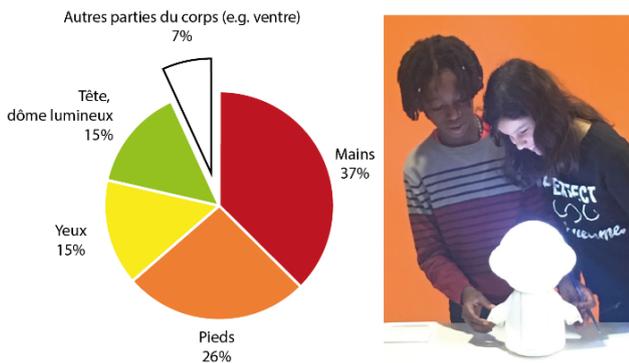


Figure 5: Parties de Teegi manipulées par les enfants. A gauche : graphique présentant le pourcentage du nombre total de manipulations de l'élément en rapport au nombre total d'éléments manipulés; à droite: exemple de manipulation collaborative typiquement observable; un élève est observateur pendant qu'un autre manipule.

Lors de l'analyse vidéo, on constate que les enfants agissent en tant qu'utilisateurs uniquement lors de la phase de découverte et les comportements de cette nature ne sont que très rarement observés ensuite. Les comportements de jeu avec Teegi sont quasi inexistant dans ce contexte d'usage. Ils ne sont observés que dans le groupe G et opérés que par une seule élève. Pourtant, les enfants ont tendance à voir, plus que les adultes, les aspects ludiques d'un produit [28]. Ils ont des attentes fortes de ce point de vue. Son apparence de poupon/robot en plastique aurait ainsi pu conduire les enfants à jouer. Or, sur une durée de session moyenne de 15 min, près de 60% du temps total de la session (Table 1) est consacré à des interactions pour comprendre les phénomènes observables sur le crâne de Teegi. Les manipulations sont très nombreuses (i.e. en moyenne 25 à 50 manipulations par session), chacune de courte durée (de 3 à 10 secondes) et alternant avec le renseignement des fiches. Les moments de perte d'attention ou de distraction sont extrêmement rares (50'' par enfant en moy. par session). Les zones manipulées restent essentiellement les zones interactives de l'interface (Fig. 5) guidées par des objectifs d'observation et de découverte des phénomènes. Teegi est ici utilisé comme une interface éducative par les enfants qu'ils soient filles ou garçons.

D'une manière générale dans les groupes de 3, chacun à son tour manipule spontanément Teegi et se place en observateurs attentifs des conséquences des manipulations de leurs

camarades (Fig.5) et/ou notent leurs observations le reste du temps. Cette modalité de travail avec Teegi permet dans ces groupes une participation équitable et la fréquence des gestes d'indication ou de déplacement de Teegi pour aider à voir les zones activées (en moyenne chaque enfant opère 1 geste d'indication toutes les 50 secondes) marque l'entraide et la collaboration entre les enfants. A contrario, il est à noter que dans les groupes G et H, dont le nombre d'élèves est plus élevé, les comportements de manipulation par deux ou trois enfants simultanément sont plus nombreux; chacun d'entre eux n'arrivant pas à attendre son tour. Ceci est un aspect qui a des conséquences sur la qualité de leurs observations car alors toutes les zones actives s'allument simultanément, ce qui peut leur rendre difficile l'observation du lien de cause à effet (Table 1). Les typologies d'interactions notées, non guidées par un adulte, systématiquement engagées selon une approche collaborative (chacun étant tour à tour observateur, manipulateur et solidaire) dans les petits groupes, sont plutôt coopératives, voire individualistes, en plus grand groupe (i.e. élèves manipulateurs ou observateurs et co-opération des investigations). Ceci pourrait expliquer que ces groupes (respectivement G et F) aient des performances plus hétérogènes de par le cloisonnement des tâches (Voir § 5.2).

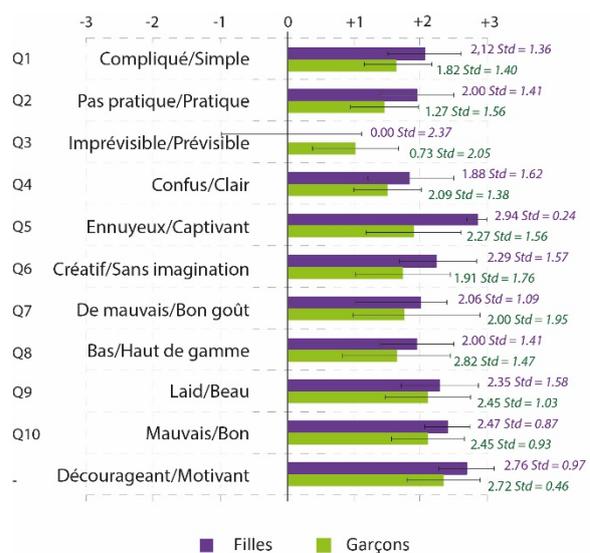


Figure 6: Scores moyens obtenus par Teegi, en fonction du genre, au questionnaire Attrakdiff simplifié à la question « Après avoir utilisé Teegi, je le trouve... ». L'évaluation est effectuée selon une échelle de discrimination sémantique en 7 points (e.g. (-3) Complicé/Simple (+3)); respectivement codé ultérieurement -3, -2, -1, 0, 1, 2 ou 3. Les attributs des Q1 à 4 =Qualités Pragmatiques, Q 5 à 8 =Qualités Hédonistes; Q 9 et 10 = Attractivité globale du système (d'après [24]). Le dernier Item correspond à la motivation.

5.1.3 *Expérience utilisateur.* Les réponses à la question « Voilà Teegi, comment tu le trouves ? » (i.e. test des 5 secondes) expriment majoritairement des émotions positives « il est super ! » ; « bien ! », « oh! trop mignoooooooooon ! », « il est trop, trop beau »; aucun élève n'a semblé effrayé ou repoussé par

l'interface. Les réactions sont très proches de celles observables lors d'interactions humaines. Nombreux sont ceux qui saluent spontanément Teegi en lui faisant un signe de la main et/ou avec des « Salut ! », « Coucou ! » ou encore « Bonjour petit truc ». D'ailleurs, des élèves font remarquer qu'« on dirait vraiment un humain ». Près d'un tiers des élèves indique qu'« il sourit ! » ou qu'« il rigole avec ses yeux » lorsque Teegi cligne des yeux, et ce bien qu'il soit dépourvu de bouche (Fig. 2). Ils se sont montrés tous très enthousiastes et impatients. Si l'on regarde les attributs pragmatiques de l'interface, jugés via le questionnaire Attrakdiff simplifié, et qui décrivent l'utilisabilité du système (i.e. Q1 à Q4, Fig.6),

Teegi a été jugé comme simple, clair et pratique (score moyen aux questions liées à la Qualité Pragmatique (QP) : 1.49 Std= 1.65; score min = -3; score max = 3; neutre = 0). Les attributs hédonistes (i.e. Q5 à Q8, Fig.6), qui reflètent dans quelle mesure le produit peut soutenir le besoin de stimulation et la possibilité de s'identifier au système, sont ici plus fortement valorisés (Score moyen Qualité Hédoniste (QH) : 2.20 Std = 1.39; score min = -3; score max = 3; neutre = 0). Notamment, Teegi est jugé beau (score moyen total : 2.36 std = 1.39 ; score min = -3; score max = 3; neutre = 0) et particulièrement captivant (score moyen total : 2.68 std = 1.04; score max = 3). Cette attractivité perçue indique que Teegi est une interface tangible "désirée" avec une légère survalorisation des attributs hédonistes pour les filles (Score moyen QP filles: 1.50 std = 1.69 et QP Garçons: 1.48 Std = 1.60; Score moyen QH filles: 2.32 std = 1.08 et QH Garçons: 2.00 Std = 1.68). Les différences de perceptions ne sont ici pas significatives d'un point de vue statistique entre les genres et les réponses des 4 élèves en situation de handicap se situent dans la moyenne des autres élèves. L'utilisabilité de Teegi ne semble pas discriminer les enfants du point de vue de ces caractéristiques mais les ici stimulent.

Plus que son caractère pragmatique, l'apparence du système et l'effet de halo qui lui est associé ont eu un impact ici sur i) son attrait, ii) le plaisir et iii) la satisfaction à l'utiliser. L'apparence anthropomorphique et joyeuse de Teegi a mobilisé dès les premières impressions, et tout au long de son utilisation, une dimension affective et émotionnelle positive chez tous les élèves. Son esthétisme et son potentiel à soutenir le besoin de stimulation émotionnelle a induit une forte attractivité qui peut influencer le désir d'apprendre et est un levier pour s'engager dans un apprentissage choisi et actif [30; 38]. Cela a également été favorable ici à l'inclusion des élèves en situation de handicap et rendu attractif pour les filles un domaine souvent attribué comme masculin [21; 25] que sont les sciences et technologie.

5.1.4 *Limites*. Un élève a peu valorisé Teegi (QP moy: 0.99 et QH moy:-2). Il convient de noter qu'il s'agit d'un élève qui a mis beaucoup de temps à remplir son questionnaire et qui n'a pu aller en récréation en même temps que les autres. Ce point qui peut sembler anecdotique permet de rappeler l'importance du contexte lors des tests utilisateurs avec des enfants. Les enfants étant plus sensibles et plus tranchés que les adultes [27], leurs réponses peuvent être très impactées par le contexte d'usage et donc biaiser les résultats bien plus qu'avec des adultes. Il convient donc de considérer l'ensemble des résultats en prenant en compte le contexte d'utilisation autant que l'interface elle-même.

5.2 Impacts sur les apprentissages

5.2.1 *Efficacité et efficacité: Impact que l'évolution des représentations*. A l'issue de la session d'expérimentation, une évolution des connaissances des enfants a été observée dans les compétences visées qui étaient: i) la capacité à représenter le cerveau ; ii) prendre conscience que le cerveau est structuré et que certaines zones sont dédiées à des fonctions spécifiques ; ici la motricité des membres et la vue ; iii) comprendre qu'il existe un lien de cause à effet entre mouvements et activité cérébrale.

Après le temps de manipulations, observations et explorations, les représentations du cerveau produites lors du post-test ont sensiblement évolué par rapport aux pré-tests (Fig.7). Ainsi, 57% des dessins réalisés présentent le cerveau de façon schématique (au lieu de 18% en pré-test) témoignant pour ces enfants d'une imagerie mentale plus fonctionnelle que factuelle (i.e. représentations anatomiques) ou métaphorique. Les enfants qui n'étaient pas en mesure de produire une représentation graphique (i.e. non caractérisable) ont fortement diminué.

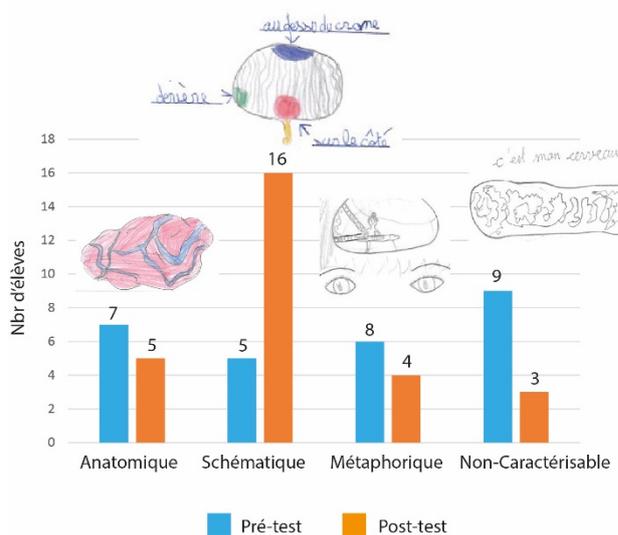


Figure 7: Evolution des typologies de représentations du cerveau entre les pré et post-tests et exemples de productions des élèves associées.

Bien que seulement 16 enfants font une représentation schématique totalement exacte et correctement annotée (Table 1), 23 enfants sur les 28 (dont deux des 4 élèves en situation de handicap) ont été en mesure de replacer correctement tout ou partie des aires cérébrales observées (i.e. zones des mains, des pieds et de la vue séparées et placées correctement les unes par rapport aux autres) sur leur schéma. De plus, près d'un enfant sur trois a ressenti le besoin de placer des repères spatiaux (e.g. arrière de la tête, côté droit - e.g. Rep. schématique Fig.7) mettant en évidence que ces élèves ont trouvé remarquables la localisation des zones actives. A titre de comparaison, aucun enfant n'avait été en mesure de placer des aires fonctionnelles durant le pré-test et un seul avait placé des indicateurs spatiaux sur son dessin antérieurement à l'expérimentation. Il est à noter qu'il n'apparaît pas de différences dans la nature des productions des enfants en fonction de leur genre.

L'analyse des productions écrites des élèves met en évidence que seuls 11 des 28 élèves ont bien perçu le lien de cause à effet entre mouvement et activation de l'aire cérébrale dédiée et ce

plus particulièrement lorsque les manipulations sont menées en trio et non en grand groupe, exception faite des élèves en situation de handicap (Table 1). Il est à noter également que seulement 9 élèves ont indiqué que les aires des mains sont inversées selon que l'on bouge la main droite ou gauche. Ces deux points demanderaient à être mieux mis en évidence à l'avenir.

Bien que certains enfants aient encore des lacunes, ces résultats indiquent qu'utiliser Teegi seulement 15 minutes dans un contexte tel que celui mis en œuvre est favorable à l'apprentissage des notions visées et ce sans discrimination des publics.

5.2.2 Perception de l'objectif d'apprentissage. Pour qu'un environnement d'apprentissage puisse être totalement efficace, il faut que l'objectif et le domaine de connaissances visé soit rendu explicite à l'apprenant [14]. Ici, cet objectif n'avait pas été indiqué aux enfants ni en amont, ni durant la session de test, dans le but de vérifier si le modèle pédagogique qu'est Teegi était en lui-même explicite; i.e. si les contenus d'apprentissage sont évidents, tangibles, pour des enfants.

L'analyse lexicale des réponses proposées aux questions du post-test « *Qu'est-ce que Teegi permet d'apprendre ?* » (23 répondants sur 29 élèves) et « *Quelles sont tes remarques sur Teegi ?* » indiquent qu'une majorité des élèves répondants (16 sur les 23) a correctement identifié l'objectif à savoir « *Apprendre un peu plus sur le cerveau et comment qu'on peut contrôler notre cerveau* » (domaine rouge Fig. 8). Il à noter que ces enfants correspondent tous à ceux qui ont produit un schéma totalement correcte. Cependant, les résultats marquent une possible ambiguïté pour d'autres. Ainsi, un second domaine sémantique (domaine orange Fig. 8) met en évidence que pour une autre partie des élèves l'objectif était pour eux lié au domaine des technologies. Même si pour certains (5 élèves sur les 23), ces deux domaines se recouvrent (e.g. « *Voir un robot qui apprend le cerveau comment y fonctionne quand on bouge* »), l'objectif pédagogique n'est pas ici clairement explicite pour tous les élèves et est globalement confondu avec celui de la demi-journée thématique. De plus, son « humanité » a également beaucoup interrogée (e.g. « *Est-ce qu'il parle ?* », « *Est-ce qu'il marche ?* », « *Quel âge il a ?* ». Aussi, il n'est pas surprenant qu'un troisième domaine du champ lexical (Domaine vert Fig. 8) fasse majoritairement référence à des traits de la personnalité humaine véhiculant des émotions positives (e.g. Teegi est « *rigolo* »; « *intelligent* », « *drôle* »).

5.2.3 Impact motivationnel. La motivation scolaire correspond à l'ensemble des facteurs qui poussent l'élève à s'engager dans la tâche, à adopter un comportement qui lui permette d'apprendre et persévérer dans les difficultés [55]. La motivation est fortement liée à la perception qu'a un apprenant du sens de l'activité proposée, au fait qu'il ait le sentiment de contrôlabilité de la tâche ou de ses propres compétences pour l'accomplir. Le test de la valeur motivationnelle d'une activité pédagogique utilisé ici permet d'avoir un regard plus global sur l'impact de la situation d'apprentissage avec Teegi.

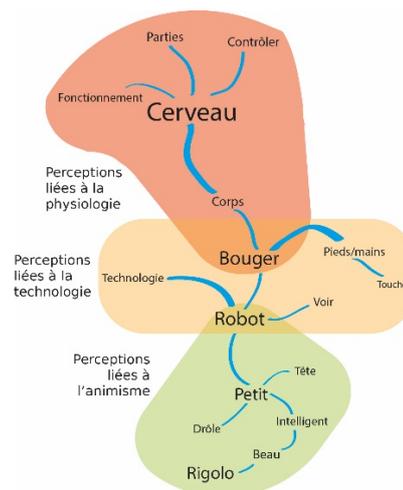


Figure 8: Résultats de l'analyse de similitude (via IRaMuTeQ [42]) représentant les relations entre les formes lexicales dans les corpus textuels post-test et mettant en évidence trois domaines de connaissances perçues par les enfants 1) le fonctionnement cérébral (en rouge); 2) la technologie (en orange) et 3) un personnage humanisé (en vert). La taille des mots est proportionnelle au nombre d'occurrences dans le corpus traité ; la taille des liens est proportionnelle au nombre de fois où les mots sont cités ensemble.

Les résultats indiquent que les savoirs qui sont travaillés via Teegi ne rencontrent pas un engouement élevé dans le quotidien des élèves (l'item « *l'activité menée avec Teegi est en lien avec ce qui m'intéresse au quotidien* » obtient un score ici proche de la neutralité; 2.62 std = 1.17 – Fig. 9). Pourtant, les résultats obtenus au test d'utilisabilité indiquent que l'activité pédagogique avec Teegi est jugée très motivante (2.75 std= 0.81; score max = 3), ce critère obtenant le score le plus élevé de tous (voir Fig. 6). Le test d'impact motivationnel nous permet de mieux cerner les déterminants favorables à la motivation ressentie par les enfants, ce au-delà de l'effet de nouveauté lié à l'interface (Fig. 9). Ainsi, les résultats mettent en évidence que utiliser Teegi dans les conditions décrites a agi sur 5 des 9 leviers favorables à la motivation scolaire telle que définie précédemment.

Au-delà de la durée de l'activité qui est jugée suffisante (3.21 std = 0.89; score max. de 4 = toujours) et de la clarté de l'activité (3.48 std = 0.69; score max. 4 = toujours), ce que les élèves valorisent ici est associable aux faits

- qu'ils aient pu collaborer avec leurs camarades au cours de l'activité (3.38 std = 0.74; Score max. 4 = toujours),
- qu'ils aient été amenés à faire des choix pour réaliser la tâche (2.9 std = 0.77) et
- qu'ils aient fait des tâches jugées variées/différentes (2.83 std=0.85).

L'activité menée avec Teegi était/m'a demandé...

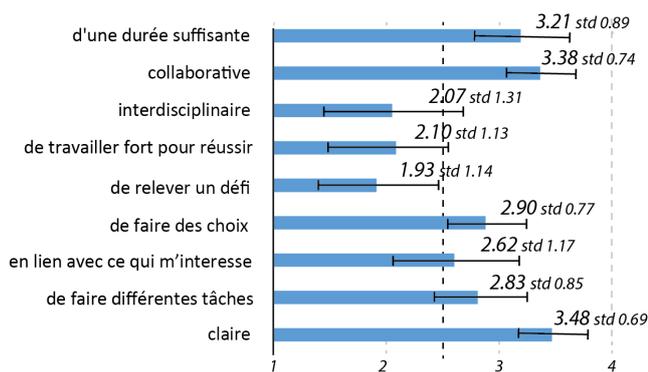


Figure 9: Résultats moyens obtenus aux 9 questions du test de la valeur motivationnelle de l'activité menée avec Teegi; ici codé 1 pour Jamais; 2-Rarement; 3-Souvent et 4-Toujours. Score min. =1; score neutre = 2.5; score max = 4.

Ces résultats corroborent l'idée que les interfaces tangibles seraient favorables à la collaboration (e.g. [6; 22]), cependant dans la limite de la taille des groupes comme observé précédemment. Il semble que manipuler Teegi pour apprendre dans l'environnement physique et social, avec un degré d'autonomie dans la conduite de la tâche, impacte ici la dynamique motivationnelle, et ce même si le savoir médié n'est pas a priori un centre d'intérêt fort des élèves.

5.2.4 Limites. Il conviendra cependant d'être vigilant à ce que le lien causal soit mieux mis en évidence compte tenu du faible nombre d'enfants ayant perçu ce dernier.

La collusion entre objet technologique animé et humanité présente également des obstacles à l'apprentissage scientifique et notamment le fait d'activer les pensées animiste et réaliste enfantines. Ainsi, par exemple *N.* écrit « *il est petit, il a des sentiments et il ne peut pas bouger tout seul* » ce qui illustre une confusion dans la maîtrise du concept du vivant et à comprendre le monde physique. La confusion possible des objectifs intrinsèques à Teegi est un aspect qui devra être pris en compte par les médiateurs ou enseignants lors de l'intégration de cette interface dans leurs pratiques et ce d'autant plus qu'il y a un lien entre les élèves qui n'ont pas clairement identifié l'objectif d'apprentissage en physiologie et les résultats graphiques aux post-tests les moins précis voire erronés.

De plus, les notions d'engagement cognitif, de défi et d'interdisciplinarité nécessaires à une dynamique motivationnelle permettant de persévérer sont ici faiblement valorisées. Ceci est sans aucun doute lié au fait que la variété des manipulations proposées par Teegi est limitée et que l'ensemble des possibilités interactionnelles sont épuisées au cours de 10 minutes de manipulations. Teegi semble donc difficilement utilisable au-delà d'un usage ponctuel tel que mis en place ici. La tâche pourrait alors apparaître lassante, répétitive, et perdant en sens.

6 CONCLUSION

D'une manière générale, les résultats de cette étude, obtenus en croisant outils d'évaluation des IHM et des apprentissages, conduite en contexte réel d'usage, indiquent que les hypothèses

H1: *l'utilisabilité de Teegi est adaptée à des enfants de 8 à 11 ans*, et H2: *Teegi favorise les premiers apprentissages de la structuration cérébrale pour une grande partie des enfants utilisateurs*, sont non-rejetées. Les interactions, bien que menées sur une courte durée, ont été favorables à l'évolution des représentations de nombreux enfants sur le fonctionnement cérébral. Elles ont engagé les enfants dans des tâches réelles d'apprentissage et non de jeu. Teegi s'est révélé non discriminante vis à vis du genre et des enfants porteurs de handicap. Son esthétisme en particulier a induit une forte attractivité et rendu la tâche d'apprentissage désirable en véhiculant des émotions positives impactant les trois dimensions de l'apprenance (i.e. attitude qui exprime la volonté d'apprendre [3]) qu'elles soient 1) cognitive, 2) affective ou 3) conative.

Bien que Teegi présente un potentiel pédagogique certain, l'hypothèse H3: *Ce support tangible possède des qualités pédagogiques permettant une entrée positive dans les apprentissages sur le fonctionnement cérébral* est ici cependant partiellement rejetée. Ainsi, les obstacles didactiques liés au lien causal, aux caractères technologique, animé et anthropomorphique de Teegi devront faire l'objet d'une attention particulière pour ne pas être entretenus. De plus, le défi que représente l'utilisation de Teegi pour apprendre est peu motivant. Aussi, pouvoir exploiter Teegi sur un temps d'atelier plus long ou sur plusieurs séances demanderait de concevoir de nouvelles interactions et de les penser pour qu'elles permettent la résolution de problèmes complexes. Aussi, nous envisageons l'intégration de nouvelles fonctionnalités comme une caméra près des yeux de Teegi. En analysant le flux optique, il serait alors possible d'enrichir l'espace d'interaction. Par exemple, les réponses cérébrales différentes produites à la visualisation d'images de nature différentes (e.g. lignes horizontales ou lignes verticales) seraient ainsi visualisables sur le crâne de Teegi, de même que la position de l'image par rapport aux yeux de Teegi (sur sa droite, en haut) ayant aussi un impact sur la localisation des groupes de neurones impliqués. De plus, l'intégration de microphones près des oreilles de Teegi permettrait de mettre en évidence la différence des zones activées lors du traitement de la parole par rapport à des bruits quelconques.

Au-delà des résultats obtenus dans cette étude permettant d'améliorer la version actuelle de Teegi, ainsi que d'alimenter l'argumentation autour des potentialités des TUIs pour l'apprentissage, les outils d'estimation de valeur pédagogique, les tests d'expérience utilisateur et de l'analyse comportementale proposés ici se sont révélés adaptés au public et à une approche en contexte. De plus, les tests de valeur motivationnelle, d'analyse lexicale de questions subjectives post-tests ont permis de nuancer les résultats et de percevoir l'interface de façon plus objective vis à vis de son potentiel pédagogique réel que si seuls les tests d'utilisabilité avaient été utilisés ou si ces tests avaient été menés en conditions de laboratoire. Cette étude met donc en évidence la nécessaire complémentarité des outils d'évaluation des IHM et des sciences de l'éducation dans la mesure du potentiel pédagogique.

ÉTHIQUE ET DÉONTOLOGIE

L'ensemble des expérimentations a été conduit à l'issue de l'obtention 1- de l'accord institutionnel de l'Éducation Nationale, 2- des accords de la directrice de l'école et de

l'enseignant en charge des élèves ; 3- des accords de consentements éclairés des représentants légaux des enfants leur permettant de participer à la session, ainsi que d'être filmés et/ou photographiés. De plus, une demande de droits à l'image a été spécifiquement demandée et est ici respectée.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les étudiants du Master MEEF-IP de l'Université de Lorraine et plus particulièrement Pauline Nicolas pour ses retranscriptions audio, Julien Bonhomme et tout le personnel de l'atelier Canopé 57, Mme Jacky Basso directrice de l'école et enfin tous les enfants ayant participé ainsi que leur enseignant. Nous souhaitons également remercier Renaud Gervais, Maxime Duluc, Hugo Germain et Fabien Lotte qui ont contribué à la conception des différentes versions de Teegi

RÉFÉRENCES

- [1] Jean Pierre Astolfi, Brigitte Peterfalvi, and Anne Vérin, 1998. *Comment les enfants apprennent les Sciences*. Pédagogie, RETZ, Paris.
- [2] Khaled Attrassi and Mohamed Haimed, 2015. Utilisation des représentations initiales pour améliorer l'apprentissage des élèves de seconde en SVT. *European Scientific Journal*, ESJ 11, 7.
- [3] Philippe Carré, 2005. *L'apprenance*. Dunod, Paris.
- [4] Marine Cosco, 2016. *Comment rendre autonomes des élèves de cycle 2 dans leur gestion du travail?* Master MEEF - Premier degré. Adv. S. Fleck. ESPE de Lorraine.
- [5] Sébastien Cuendet, Jessica Dehler-Zufferey, Giulia Ortoleva, and Pierre Dillenbourg, 2015. An integrated way of using a tangible user interface in a classroom. *International Journal of Computer-Supported Collaborative Learning* 10, 2, 183-208. DOI= <http://dx.doi.org/doi:10.1007/s11412-015-9213-3>.
- [6] Son Do-Lenh, Patrick Jermann, Sébastien Cuendet, Guillaume Zufferey, and Pierre Dillenbourg, 2010. Task Performance vs. Learning Outcomes: A Study of a Tangible User Interface in the Classroom. In *Sustaining TEL: From Innovation to Learning and Practice*, M. Wolpers, P. Kirschner, M. Scheffel, S. Lindstaedt and V. Dimitrova Eds. Springer Berlin Heidelberg, 78-92. DOI= http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-16020-2_6.
- [7] Catherine Downey and Sherin Wafaai Kamel, 2016. Storytime with Hue: An Innovative Approach to Storytelling Where Storytellers Control a Dynamic Lighting Environment. In *Proceedings of the Proceedings of the TEI '16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (Eindhoven, Netherlands, 2016), ACM, 2856543, 422-427. DOI= <http://dx.doi.org/10.1145/2839462.2856543>.
- [8] Stephen H Fairclough, 2009. Fundamentals of physiological computing. *Interacting with computers* 21, 1, 133-145.
- [9] Stéphanie Fleck and Martin Hachet, 2016. Making tangible the intangible: Hybridization of the real and the virtual to enhance learning of abstract phenomena. *Frontiers in ICT* 3, 30.
- [10] France - Ministère De L'éducation Nationale De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche, 19 novembre 2015. Bulletin officiel spécial n°10. Programmes d'enseignement du cycle des apprentissages fondamentaux (cycle 2), du cycle de consolidation (cycle 3) et du cycle des approfondissements (cycle 4), 391.
- [11] France - Ministère De L'éducation Nationale De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche, 23 avril 2015. Bulletin officiel n° 17. Socle commun de connaissances, de compétences et de culture.
- [12] Jérémy Frey, Renaud Gervais, Stéphanie Fleck, Fabien Lotte, and Martin Hachet, 2014. Teegi: Tangible EEG Interface. In *Proceedings of the 27th ACM User Interface Software and Technology Symposium, UIST 2014* (Honolulu, Hawai, 2014), ACM, 301-308.
- [13] Jérémy Frey, Renaud Gervais, Thibault Lainé, Maxime Duluc, Hugo Germain, Stéphanie Fleck, Fabien Lotte, and Martin Hachet, 2017. Scientific Outreach with Teegi, a Tangible EEG Interface to Talk about Neurotechnologies. In *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (Denver, CO USA, 2017), ACM, 405-408 DOI= <http://dx.doi.org/10.1145/3027063.3052971>.
- [14] Robert M Gagne, Walter W Wager, Katharine C Golas, John M Keller, and James D Russell, 2005. Principles of instructional design Wiley Online Library.
- [15] Renaud Gervais, Jérémy Frey, Alexis Gay, Fabien Lotte, and Martin Hachet, 2016. Tobe: Tangible out-of-body experience. In *Proceedings of the TEI'16: Tenth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* (Eindhoven, 2016), ACM, 227-235.
- [16] Shuli Gilutz, Sandra Calvert, Kathleen Kremer, Barbara Chamberlin, and Geri Gay, 2012. Tangible interfaces for children: cognitive, social, & physical benefits and challenges. In *Proceedings of the CHI'12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems* (Austin, Texas, USA, 2012), ACM, 1123-1126.
- [17] Marc Hassenzahl, 2003. The Thing and I: Understanding the Relationship Between User and Product. In *Funology: From Usability to Enjoyment*, M.A. Blythe, K. Overbeeke, A.F. Monk and P.C. Wright Eds. Springer Netherlands, Dordrecht, 31-42. DOI= http://dx.doi.org/10.1007/1-4020-2967-5_4.
- [18] Michael Hawley, 2010. Rapid Desirability Testing: A Case Study. *Accessed online* 15, 04, 2010.
- [19] Michael S Horn, R Jordan Crouser, and Marina U Bers, 2012. Tangible interaction and learning: the case for a hybrid approach. *Personal and Ubiquitous Computing* 16, 4, 379-389.
- [20] Kasper Hornbæk, 2010. Dogmas in the assessment of usability evaluation methods. *Behaviour & Information Technology* 29, 1, 97-111.
- [21] Juan Pablo Hourcade, 2015. Child-computer interaction. *Self*.
- [22] Hannes Kaufmann and Dieter Schmalstieg, 2003. Mathematics and geometry education with collaborative augmented reality. *Computers & Graphics* 27, 3, 339-345.
- [23] Sébastien Kubicki, Denis Pasco, and Ingrid Arnaud, 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. (French). *STICEF* 21, 1.
- [24] Carine Lallemand, Vincent Koenig, Guillaume Gronier, and Romain Martin, 2015. Création et validation d'une version française du questionnaire AttrakDiff pour l'évaluation de l'expérience utilisateur des systèmes interactifs. *Revue Européenne de Psychologie Appliquée/European Review of Applied Psychology* 65, 5, 239-252.
- [25] Marcia C. Linn and Janet S. Hyde, 1989. Gender, Mathematics, and Science. *Educational researcher* 18, 8, 17-27. DOI= <http://dx.doi.org/doi:10.3102/0013189X018008017>.
- [26] Panos Markopoulos and Mathilde Bekker, 2003. On the assessment of usability testing methods for children. *Interacting with computers* 15, 2, 227-243.
- [27] Panos Markopoulos, Janet C Read, Stuart Macfarlane, and Johanna Hoysniemi, 2008. *Evaluating children's interactive products: principles and practices for interaction designers*. Morgan Kaufmann.
- [28] Panos Markopoulos, Janet Read, Johanna Hoysniemi, and Stuart Macfarlane, 2008. Child computer interaction: advances in methodological research. *Cognition, Technology & Work* 10, 2, 79-81. DOI= <http://dx.doi.org/10.1007/s10111-007-0065-0>.
- [29] Paul Marshall, 2007. Do tangible interfaces enhance learning? In *Proceedings of the TEI' 07 - 1st international conference on Tangible and embedded interaction* (Baton Rouge, Louisiana, 2007), ACM, 163-170.
- [30] Philippe Meirieu, 1989. *Apprendre... oui, mais comment*. ESF éditeur, Paris.
- [31] Jonathan Mercier-Ganady, Fabien Lotte, Emilie Loup-Escande, Maud Marchal, and Anatole Lécuyer, 2014. The Mind-Mirror: See your brain in action in your head using EEG and augmented reality. In *Proceedings of the 2014 IEEE Virtual Reality (VR)* (Minneapolis, Minnesota, USA, 2014), IEEE, 33-38.
- [32] Leyla Norooz, Matthew Louis Mauriello, Anita Jorgensen, Brenna McNally, and Jon E. Froehlich, 2015. BodyVis: A New Approach to Body Learning Through Wearable Sensing and Visualization. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems* (Seoul, Republic of Korea, 2015), ACM, 2702299, 1025-1034. DOI= <http://dx.doi.org/10.1145/2702123.2702299>.
- [33] Gunnhildur Óskarsdóttir, 2006. *The development of children's ideas about the body: How these ideas change in a teaching environment*. University of Iceland, Faculty of Social Sciences.
- [34] Bundit Panchaphongsaphak, Rainer Burgkart, and Robert Riener, 2007. Three-dimensional touch interface for medical education. *IEEE transactions on information technology in biomedicine* 11, 3, 251-263.
- [35] Seymour Papert, 1980. *Mindstorms: Children, computers, and powerful ideas*. Basic Books, Inc.
- [36] Elena Pasquinelli, Gabrielle Zimmermann, Anne Bernard-Delorme, and Béatrice Descamps-Latscha, 2013. *Les écrans, le cerveau... et l'enfant. Un projet d'éducation à un usage raisonné des écrans pour l'école primaire*. Editions Le Pommier en partenariat avec la Fondation La Main à la Pâte, Paris.
- [37] Wilder Penfield and Edwin Boldrey, 1937. Somatic motor and sensory representation in the cerebral cortex of man as studied by electrical stimulation. *Brain: A journal of neurology*.
- [38] Philippe Perrenoud, 2003. Qu'est-ce qu'apprendre? *Enfances & Psy*, 4, 9-17.
- [39] Jean Piaget, 1964. *Six études de psychologie*. Denoël.
- [40] Jean Piaget and Rolando Garcia, 1971. *Les explications causales: par Jean Piaget. Avec la collab. de R. Garcia*. Presses universitaires de France.
- [41] Renée Pinard, Pierre Potvin, and Romain Rousseau, 2004. Le choix d'une approche méthodologique mixte de recherche en éducation. *Recherches qualitatives* 24, 58-80.
- [42] Pierre Ratinand, 2009. IRaMuTeQ: Interface de R pour les Analyses Multidimensionnelles de Textes et de Questionnaires [programme informatique]. En ligne <http://www.iramuteq.org>.
- [43] Edith Saltiel, Karen Worth, and Mauricio Duque, 2009. POLLEN - L'enseignement des sciences fondé sur l'investigation. *Conseils pour les enseignants*. La main à la pâte.

- [44] Theodosios Sapounidis, Stavros Demetriadis, and Ioannis Stamelos, 2015. Evaluating children performance with graphical and tangible robot programming tools. *Personal and Ubiquitous Computing* 19, 1, 225-237.
- [45] Bertrand Schneider, Patrick Jermann, Guillaume Zufferey, and Pierre Dillenbourg, 2011. Benefits of a Tangible Interface for Collaborative Learning and Interaction. *Learning Technologies, IEEE Transactions on* 4, 3, 222-232. DOI= <http://dx.doi.org/10.1109/TLT.2010.36>.
- [46] Orit Shaer and Eva Hornecker, 2010. Tangible user interfaces: past, present, and future directions. *Foundations and Trends in Human-Computer Interaction* 3, 1-2, 1-137.
- [47] Andreas Sonderegger and Juergen Sauer, 2010. The influence of design aesthetics in usability testing: Effects on user performance and perceived usability. *Applied Ergonomics* 41, 3 (5//), 403-410. DOI= <http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.apergo.2009.09.002>.
- [48] John Sweller, 1999. *Instructional Design in Technical Areas*. Australian Education Review. ERIC.
- [49] Noam Tractinsky, Adim S. Katz, and D. Ikar, 2000. What is beautiful is usable. *Interacting with computers* 13, 2 (12//), 127-145. DOI= [http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0953-5438\(00\)00031-X](http://dx.doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S0953-5438(00)00031-X).
- [50] André Tricot, Fabienne Plégat-Soutjis, Jean-François Camps, Alban Amiel, Gladys Lutz, and Agnès Morcillo, 2003. Utilité, utilisabilité, acceptabilité: interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain 2003 ATIEF*; INRP, 391-402.
- [51] Thomas S Tullis and Jacqueline N Stetson, 2004. A comparison of questionnaires for assessing website usability. In *Usability professional association conference*, 1-12.
- [52] Seçil Uğur, 2013. *Wearing embodied emotions: A practice based design research on wearable technology*. Springer Milan.
- [53] Ja Vessey, Karin Bannerot Braithwaite, and Marie Wiedmann, 1990. Teaching children about their internal bodies. *Pediatric nursing* 16, 1, 29.
- [54] Rolland Viau, 1999. *La motivation dans l'apprentissage du français*. ERPI Montréal.
- [55] Rolland Viau, 2009. *La motivation en contexte scolaire*. De boeck, Bruxelles.
- [56] Rolland Viau and Josée Bouchard, 2000. Validation d'un modèle de dynamique motivationnelle auprès d'élèves du secondaire. *Canadian Journal of Education / Revue canadienne de l'Education* 25, 1, 16-26. DOI= <http://dx.doi.org/10.2307/1585865>.
- [57] Xuan Wang and Adrian David Cheok, 2011. ClayStation: a mixed reality gaming platform supporting playful learning for children. In *Proceedings of the Proceedings of the 8th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology* (Lisbon, Portugal, 2011), ACM, 2071509, 1-2. DOI= <http://dx.doi.org/10.1145/2071423.2071509>.
- [58] Michele A Williams, Asta Roseway, Chris O'dowd, Mary Czerwinski, and Meredith Ringel Morris, 2015. Swarm: an actuated wearable for mediating affect. In *Proceedings of the Ninth International Conference on Tangible, Embedded, and Embodied Interaction* ACM, New York, 293-300.
- [59] Jonathan Wolpaw and Elizabeth Winter Wolpaw, 2012. *Brain-computer interfaces: principles and practice*. Oxford University Press USA.
- [60] Lesley Xie, Alissa N Antle, and Nima Motamedi, 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, Bonn, Germany, 191-198.
- [61] Svetlana Yarosh, Iulian Radu, Seth Hunter, and Eric Rosenbaum, 2011. Examining values: an analysis of nine years of IDC research. In *Proceedings of the 10th International Conference on Interaction Design and Children* ACM, Ann Arbor, Michigan, 136-144.
- [62] Bieke Zaman, Vero Vanden Abeele, Panos Markopoulos, and Paul Marshall, 2012. Editorial: the evolving field of tangible interaction for children: the challenge of empirical validation. *Personal and Ubiquitous Computing* 16, 4, 367-378. DOI= <http://dx.doi.org/10.1007/s00779-011-0409-x>.
- [63] Yuxia Zhou, 2015. Tangible User Interfaces in Learning and Education. In *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, J.D. Wright Ed. Elsevier, Oxford, 20-25.