

# FAIRE DES MATHÉMATIQUES AVEC DES CARTES ET UN ROBOT, LE PROJET OCINAE

**Jean-Pierre RABATEL**

PEMF, chargé d'étude Institut Français de l'Éducation de Lyon  
EducTice  
jean-pierre.rabatel@ens-lyon.fr

**Sophie SOURY-LAVERGNE**

Maître de Conférences, Institut Français de l'Éducation, ENS DE LYON  
ESPE de l'Académie de Grenoble  
sophie.soury-lavergne@ens-lyon.fr

## Résumé

Le projet OCINAE a développé et testé dans des classes du CP à la 6<sup>e</sup> plusieurs jeux mathématiques dans les domaines du calcul, de la numération et du repérage dans le plan. La particularité de ces jeux est d'utiliser un dispositif hybride d'objets connectés, cartes, jetons, plateaux de jeu, stylets, qui communiquent avec une plateforme informatique par l'intermédiaire d'un petit robot mobile, d'un téléphone et de tablettes. Les élèves peuvent utiliser des objets matériels, tels que des cartes sur lesquelles sont écrits des nombres, ou des interfaces numériques, nombres affichés, pour agir sur le système et résoudre les problèmes qui leur sont posés. Le système produit des rétroactions matérielles, comme le déplacement d'un robot, et virtuelles, comme des messages sur le smartphone ou des affichages sur les tablettes.

Le compte rendu de cet atelier présente les éléments clés de ce projet, les questions de recherche traitées puis expose en détail la réflexion menée au sein du projet et reprise dans l'atelier à propos des rétroactions matérielles produites par le déplacement du robot et leur possible signification mathématique dans la résolution de problème.

Les objets connectés, c'est-à-dire des objets du monde tangible capables de communiquer un minimum d'informations à un environnement informatique, constituent une avancée technologique qu'il apparaît maintenant tout à fait possible d'expérimenter dans un cadre pédagogique. Cette avancée technologique rencontre l'intérêt important et ancien qu'ont eu les pédagogues, les psychologues et les didacticiens pour la manipulation et l'expérience concrète dans l'apprentissage en particulier celui des mathématiques. L'apparition des objets connectés permet de reconsidérer la séparation entre d'une part le monde de la manipulation d'objets, des expériences tangibles et des phénomènes physiques et d'autre part le monde de l'interaction avec un environnement numérique, accessible à travers la manipulation directe de représentations sur un écran. Le travail émergent sur les duos d'artefacts tangibles et numériques, qui propose de concevoir des situations didactiques combinant des versions matérielles et informatisées d'outils mathématiques, est une première avancée pour mettre en relation ces deux mondes jusqu'à présents considérés séparément (pour des exemples de duos d'artefacts dans le domaine numérique voir (Soury-Lavergne & Maschietto, 2013) ou (Riou-Azou & Soury-Lavergne, 2015), dans le domaine géométrique, voir (Voltolini, 2014) ou (Soury-Lavergne & Maschietto, 2015)).

Le projet OCINAE pour l'apprentissage des mathématiques à l'école élémentaire avance encore d'un pas en connectant les deux mondes, tangible et virtuel, avec un petit robot mobile. Dans ce dispositif de réalité mixte, les objets tangibles sont du type cartes, plateaux de jeu, dés, stylos et l'environnement informatique est accessible par des tablettes et un smartphone. Plusieurs jeux mathématiques exploitant les possibilités offertes par le dispositif ont été conçus. Leurs usages par une équipe d'enseignants et leurs élèves, dans le cadre scolaire ont été étudiés dans le cadre d'un projet financé de 2014 à 2016 par la Banque Publique d'Investissement France sur le programme Investissement d'avenir e-éducation « Services et contenus numériques innovants pour les apprentissages fondamentaux à l'École ». Ce

projet a été conduit par quatre partenaires lyonnais : les entreprises digiSchool et Awabot, le centre ERASME en charge des questions numériques pour la métropole de Lyon et l'Institut Français de l'Éducation. L'IFÉ, en collaboration avec le centre ERASME, a pris en charge le travail avec les enseignants du terrain.

Le compte rendu de cet atelier présente successivement : l'organisation du projet, le dispositif et les jeux conçus, puis les questions de recherches traitées dans le projet, enfin des éléments du traitement de l'une des questions relatives au choix de rétroactions tangibles et virtuelles du dispositif pour faire évoluer les stratégies de résolution des élèves, qui a été abordée avec les participants de l'atelier.

---

## I - LES OBJETS CONNECTÉS À L'ÉCOLE

---

Dès le début du projet, la conception des jeux a été menée en collaboration avec les enseignants qui allaient ensuite tester le dispositif dans leur classe. Au lancement du projet, les enseignants ont été impliqués dans les boucles de conception d'expérimentation et d'analyse des résultats, prenant part à toutes les étapes. Ce choix de collaboration avec les enseignants pour mener la recherche n'est pas anodin. Il relève d'un courant méthodologique de "recherche orientée par la conception" (Sanchez & Monod-Ansaldi, 2014). En procédant ainsi, l'objectif est de prendre en compte les difficultés avérées de dissémination des innovations dans le monde éducatif et d'intégration des technologies dans les pratiques des enseignants du premier degré (Ravenstein & Ladage, 2014).

Mais l'implication des enseignants et la collaboration avec les entreprises créent aussi des contraintes propres. Ainsi, le projet s'est-il développé en cherchant à atteindre simultanément deux objectifs : la production d'applications effectives pour le terrain - des jeux diffusables, robustes et répondant aux attentes des enseignants - et le développement de questions de recherche dans le champ de la didactique.

### 1 Un projet de recherche et son impact sur le terrain

Une caractéristique majeure des projets menés par l'Institut Français de l'Éducation est de fortement impliquer les enseignants du terrain, pour que les travaux menés produisent à la fois des résultats pour la recherche et contribuent à l'évolution de l'école et du monde éducatif. Pour OCINAEE, il s'est agi, d'une part, de concevoir, développer et diffuser des jeux mathématiques pour l'école et en dehors de l'école. Les jeux devaient donc être suffisamment robustes et attractifs et ne pas répondre uniquement aux préoccupations didactiques de l'équipe de recherche. D'autre part, pour son volet recherche, il a fallu identifier les questions relatives aux apprentissages des mathématiques avec un dispositif hybride qui seraient traitables dans le cadre du projet. Dans ce type de projet, les questions ne sont pas forcément premières, elles ne déterminent pas complètement le contenu du projet. De plus, le développement et la production de jeux diffusables ne sont pas forcément compatibles avec la conduite d'expérimentations visant la production de résultats de recherche. Une des tâches du projet a été d'identifier des questions de recherche intéressantes et traitables dans le cadre du projet. Elles sont présentées en partie 2. Les expérimentations conduites combinent la recherche d'informations nécessaires à l'avancée du projet et la production de données analysables selon un cadre théorique didactique. Ces deux dimensions ne sont pas toujours entièrement compatibles. Nous avons mis en place une méthodologie d'expérimentation à plusieurs niveaux pour pouvoir traiter les deux aspects avec les enseignants.

### 2 Démonstrateur de terrain, collaboration et processus itératif

La collaboration dans le projet a été menée à trois niveaux différents simultanément. Premièrement entre les quatre partenaires engagés dans le projet ; la proximité géographique ayant fortement contribué à des rencontres régulières et une dynamique au sein du projet. Entre les partenaires et les enseignants également, la collaboration s'est construite à travers plus de 40 ateliers de co-conception, soit lors de rencontres plénières avec tous les enseignants et les partenaires, soit en sous-groupes, autour d'une question ou d'un développement particulier. Enfin, la collaboration a également été construite avec l'institution "éducation nationale" par la mise en place d'un comité de suivi local, rassemblant les IEN et

les différentes instances de la DSDEN concernées par le projet qui a permis d'informer et de partager les points de vue entre l'institution scolaire et l'équipe du projet.

Le démonstrateur de terrain est constitué de la population d'enseignants et d'élèves participant au projet (Tableau 1), de l'équipement qui leur a été fourni au cours du projet et des processus de recueil de données mis en place. Ces trois éléments ont évolué tout au long du projet, donnant lieu au final à cinq itérations successives de boucle de conception-expérimentation- analyse.

Tableau 1. Les participants au démonstrateur de terrain

2014-2015	2015-2016
15 enseignants 15 classes du CP au CM2 6 écoles	35 enseignants 39 classes du CP à la 6 <sup>e</sup> 14 écoles et 4 collèges
390 élèves 152 en cycle 2 238 en cycle 3	969 élèves 320 en cycle 2 428 en cycle 3 221 en 6 <sup>e</sup>

La mission des enseignants a été de co-concevoir les jeux et les scénarios d'usage, de les expérimenter dans leur classe et d'observer leurs élèves ou de permettre l'observation par des tiers. Pour favoriser l'engagement des enseignants, nous avons choisi de recruter deux ou trois enseignants d'une même école. Cela avait plusieurs avantages pour le déroulement du projet, en plus de permettre d'équiper plus d'enseignants avec le même matériel, les jeux pouvant facilement passer d'une classe à l'autre au sein d'une même école. Le premier avantage a été de favoriser la collaboration entre les enseignants au sein du projet et entre les enseignants au sein d'une école. Le deuxième avantage est l'engagement d'enseignants peu technophiles. En effet, les enseignants motivés pour participer au projet ont dû s'adresser à leurs collègues de l'école pour former un groupe. Du coup, certains enseignants ont adhéré au projet pour l'intérêt qu'ils trouvaient à travailler ensemble, sur les mathématiques, plus que pour l'aspect innovant de la technologie. C'est assez rare dans les projets et néanmoins crucial pour l'appropriation des technologies. Le troisième avantage est la pérennisation des écoles dans le projet, au fur et à mesure des années et par-delà les changements d'enseignants (pour tout type de cause comme maternité, mutation, nouvelles missions...).



Figure 1. Contenu d'une mallette OCINAE avec au centre le robot, le smartphone, les tablettes, ainsi que les plateaux, jeux de cartes et autres matériels tangibles.

Le démonstrateur de terrain est également constitué des équipements mis à disposition des enseignants et de leur classe. Ces équipements ont évolué au cours du projet. En décembre 2016, une mallette OCINAEE propose quatre jeux différents et contient un robot, un smartphone, deux tablettes, cinq plateaux de jeu, des jeux de cartes, jetons, stylet et autre matériel papier, ainsi qu'une documentation, dont des guides pédagogiques pour chacun des jeux. Chaque école du projet disposait de trois mallettes.

La mise en place du démonstrateur de terrain a eu deux objectifs, celui de suivre et évaluer les usages du dispositif OCINAEE mais aussi de faire avancer la recherche et les connaissances sur l'apprentissage avec ce type de dispositif innovant. Pour atteindre ces objectifs, le démonstrateur de terrain inclut une méthodologie de recueil et d'analyse que nous avons organisé en 3 volets.

- Un volet quantitatif nous a permis d'évaluer le volume d'utilisation pour pouvoir attester d'un usage qui dépasse quelques séances isolées. Le recueil de données a été fait auprès de tous les utilisateurs. En l'absence de remontée automatisée des informations, nous nous sommes appuyés sur les déclarations des enseignants principalement via un questionnaire en ligne. Un total de 6508 élève.séance a été enregistré.
- Un volet qualitatif nous a permis d'avoir des données sur les usages du dispositif en classe que nous avons utilisées dans les itérations successives du projet pour faire évoluer les jeux et le dispositif. Nous avons organisé des campagnes d'observations de classe, des interviews d'enseignants et des interviews d'élèves pour obtenir ces données, qui ont concerné toutes les classes du démonstrateur.
- Un volet recherche a permis de travailler des questions plus précises, à partir de protocoles expérimentaux spécifiques. Par exemple, une étude des stratégies d'interaction des élèves de CP avec le dispositif et leur prise en compte de la rétroaction tangible que constitue le déplacement du robot (Mandin, De Simone, & Soury-Lavergne, 2016). Nous présentons les questions prises en charge par le projet en partie II.

### 3 Présentation des jeux OCINAEE

Une présentation de ces jeux est à retrouver sur le blog du projet : <http://ocinaee.blogs.laclassed.com/> ou sur le site EducMath : <http://educmath.ens-lyon.fr/Educmath/recherche/equipes-associees-16-17/ocinaee/>

Lors de l'atelier, en juin 2016, la mallette contenait : un robot, un téléphone, deux tablettes, un crayon optique, trois plateaux de jeu, un paquet de 39 cartes, une notice de démarrage et les règles de deux jeux.

Les deux jeux disponibles dans ces mallettes étaient :

- La course au calcul, pour l'automatisation des calculs ;
- Le nombre cible, pour les sommes de trois nombres entiers ou décimaux (voir description en III.).

Deux autres jeux étaient en cours de développement, mais pas encore utilisés dans les classes :

- Le voyage dans le plan, pour le repérage dans le plan et le codage des positions et des trajectoires d'un robot ;
- Le chiffrscope, un jeu sur la numération décimale des entiers et des décimaux qui permet de travailler les unités de numération.

---

## II - QUESTIONS DE RECHERCHE

---

Les questions traitées dans le projet, dans le cadre théorique fourni par la théorie des situations (Brousseau, 1998), concernent d'une part l'articulation du tangible et du virtuel dans le dispositif, leurs rôles respectifs dans la situation d'apprentissage construite avec le jeu, d'autre part des questions relatives aux apprentissages mathématiques et connaissances construites par les élèves lorsqu'ils jouent.

## 1 Questions relatives à l'articulation du tangible et du virtuel

Puisque le dispositif utilisé pour les jeux est un dispositif hybride, qui utilise aussi bien du matériel tangible que des interfaces numériques, accessibles sur un smartphone ou des tablettes, à chaque étape de la conception des jeux, les concepteurs ont dû et pu faire des choix quant à l'entité matérielle ou numérique qui devait porter la possibilité d'action de la part du joueur ou la rétroaction du dispositif.

- Quels choix de moyen d'action pour les joueurs sur le dispositif : tablette, smartphone, ou cartes et autre matériel tangible ?
- Quels choix de rétroaction par le dispositif : via les interfaces numériques (tablette, smartphone) ou via le comportement du robot (déplacement, son, lumière) ?

En particulier à propos des rétroactions matérielles, telles que le déplacement du robot et sa position sur le plateau :

- Les rétroactions matérielles sont-elles utiles pour l'apprentissage, c'est-à-dire permettent-elles de faire évoluer les stratégies de résolution des élèves ? A quelles conditions ?
- Quelle médiatisation de concepts mathématiques (droite des nombres et déplacement du robot, structuration du plan (grille) et positions du robot) les jeux peuvent-ils offrir ?

Plus généralement, il s'agit de décrire les relations et d'évaluer les apports respectifs du matériel et du virtuel dans l'expérience d'apprentissage mathématique de l'élève (Mandin, De Simone, & Soury-Lavergne, *op. cit.*) (Mandin, 2016).

## 2 Questions relatives aux apprentissages mathématiques des élèves et la génération automatique des parties de jeu

A partir de l'hypothèse que les jeux peuvent être analysés comme des situations d'apprentissage, les questions plus précises relatives à la situation didactique ont été formulées.

- Quelles sont les variables didactiques des situations problèmes proposées aux élèves ?
- Dans le cas du jeu du nombre cible, comment caractériser de manière générique les tirages des nombres afin de contrôler le tirage "aléatoire" des parties ? Comment regrouper ces tirages en partie de jeu faciles ou difficiles ?

Les variables didactiques du jeu du nombre cible ont été identifiées et utilisées pour générer les parties de jeu : nature du nombre cible (entier, décimal non entier), la distance entre les six nombres (distance importante ou pas), l'appui sur l'entier ou la dizaine (solution telle que la somme de deux des trois nombres est un entier ou un multiple de 10 ou pas), existence d'un distracteur (il existe ou pas une somme de deux nombres qui est égale au nombre cible) (De Simone, Guillaume, & Soury-Lavergne, 2016). L'étude, toujours en cours dans le projet, ainsi que les stratégies de résolution des élèves ont été discutées pendant l'atelier mais ne font pas l'objet de ce compte rendu.

---

## III - ARTICULATION DU TANGIBLE ET DU VIRTUEL POUR MÉDIATISER LES CONCEPTS MATHÉMATIQUES

---

Le jeu du nombre cible est inspiré des travaux de l'équipe ERMEL (Charnay, Douaire, Valentin, Guillaume, & Colomb, 2005). Le but du jeu est d'atteindre un nombre cible en additionnant trois nombres choisis parmi six nombres proposés. Il s'agit d'un jeu collaboratif qui se joue avec un plateau et un robot, le nombre cible apparaissant sur le smartphone du robot. Puis, selon la version du jeu choisie, avec carte ou avec tablettes (Figure 2), les six nombres possibles sont présentés sur des cartes ou affichés sur une tablette et leur sélection pour atteindre la cible diffère. Avec les cartes matérielles, le joueur doit les présenter aux capteurs situés sous le robot pour qu'elles soient lues et identifiées par le système. La version tablette nécessite de faire glisser avec le doigt des boules-nombres dans une zone dédiée sur la tablette, représentée par un sac au dos du robot. A chaque instant, les joueurs peuvent modifier leur

combinaison ou la valider. Le système présente des rétroactions lorsque les joueurs ont validé leur combinaison.



Figure 2. Le jeu du nombre cible. A gauche la version carte. A droite la version tablette. Dans les deux cas, le plateau est identique et le smartphone est maintenu sur le devant du robot.

Ce jeu se décline sur les nombres entiers et les nombres décimaux (écriture décimale ou fractionnaire). Au cours de l'atelier, nous n'avons traité que les menus relatifs aux nombres entiers, avec la version cartes et la version tablettes.

### 1 Quelles rétroactions du robot peuvent être mathématiquement significatives ?

Dans ce dispositif d'objets connectés, le robot tient une place particulière pour la plupart des élèves. Quand le robot est coiffé de sa perruque, les élèves le caressent, parfois le câlinent, lui parlent, le dessinent, lui fabriquent une maison ou d'autres perruques. Pour construire des situations qui permettent aux élèves d'attribuer à ce robot un rôle plus riche et plus intéressant que celui d'une mascotte ou d'un simple pion sur un plateau, en particulier un rôle dans la situation mathématique, nous avons dressé un inventaire de ses fonctionnalités. Pour créer des rétroactions, il est possible d'agir :

- sur les yeux du robot : changer leur couleur, dissocier l'éclairage d'un œil de l'autre, les faire clignoter, temporiser les éclairages,....
- sur les éclairages de ses flancs de la même manière.
- sur les sons et les messages émis par le robot : il peut parler ou émettre des sons, il peut afficher des messages écrits sur le téléphone qu'il porte devant (Figure 2).
- sur les déplacements du robot : le robot peut se déplacer sur un plateau dont la taille, le graphisme et l'impression sont choisis par les concepteurs. Ce déplacement est contraint par les dimensions du plateau, le robot ne peut pas sortir du plateau.

Ces différentes rétroactions peuvent être utilisées pour concevoir des situations d'apprentissages. Cependant, les travaux précédemment conduits par l'équipe de l'IFÉ ont montré qu'il était très utile de distinguer et d'implémenter trois types de rétroactions pour obtenir des environnements d'apprentissage de qualité : des rétroactions de manipulation directe, des rétroactions d'évaluation et des rétroactions de stratégie (Mackrell, Maschietto, & Soury-Lavergne, 2013) (Mandin et al., 2016) (Soury-Lavergne, 2016). Dans les trois cas, il s'agit de rétroactions produites par le dispositif en réponse à l'action de l'élève. Mais cette action de l'élève peut être la manipulation directe d'un élément du dispositif, la mise en œuvre d'une stratégie ou la demande d'une évaluation. Nous présentons les trois types de rétroaction pour détailler comment elles ont été implémentées dans le dispositif OCINAE ou comment elles pourraient être utilisées pour l'analyser.

Les *rétroactions de manipulation directe* sont tous les phénomènes sensibles (affichage, mouvement, son) générés par l'environnement en réponse à l'action de l'utilisateur. Ce sont les rétroactions de base que le dispositif doit produire pour toute action de l'utilisateur, afin que celui-ci sache que son action a été prise en compte. Il s'agit par exemple du clignement des yeux du robot lorsqu'une carte lui est soumise, ou bien l'apparition d'un nombre dans la sacoche du robot sur la tablette lorsque le nombre est déplacé.

Ces rétroactions résultent des choix de développement. Elles peuvent être combinées pour produire les rétroactions des deux autres types.

Les *rétroactions d'évaluation* concernent l'évaluation finale par le système de la tâche accomplie par l'utilisateur. C'est une évaluation de la réponse apportée par les élèves au problème mathématique posé, ici est-ce que la cible est atteinte. Elles doivent être suffisantes pour que l'élève sache par lui-même s'il a réussi. Les utilisateurs, élèves et enseignants, attendent d'un système informatique un verdict entre termes de « réussi » ou « non réussi », un système qui ne le proposerait pas serait considéré comme insuffisamment développé. Le dispositif OCINAEE évalue la réponse des élèves par rapport au problème posé et la communique à la demande de l'utilisateur par un affichage sur le smartphone (Figure 3) de messages comme « Bravo » ou « Essaie encore ! » ou « Dommage ! J'aurais joué... », associé à un déplacement et un clignotement des yeux, qui sont symboles de réussite ou d'échec. Ces phénomènes sont d'abord des rétroactions de manipulation directe au fait que l'élève a cliqué sur le bouton « valider ». Mais leur sens dans l'interaction avec l'utilisateur est celui d'une évaluation finale de la tâche accomplie. Le message « Essaie encore ! » ne porte aucun jugement de valeur sur la non réussite au jeu. Il demande simplement aux élèves de reprendre leurs calculs et de proposer une nouvelle combinaison. Il n'est pas stigmatisant comme pourrait l'être une remarque de l'enseignant. Mais il ne donne aucune piste pour que les élèves reprennent leur travail et adoptent une stratégie différente. Au bout de trois essais, il n'est plus possible de recommencer. Le système invalide la combinaison et propose une des solutions possibles. Bien que fournissant une rétroaction sur la solution, l'information n'est plus utilisable pour modifier les stratégies.



Figure 3. A gauche, rétroaction d'évaluation donnée par le robot via le smartphone pour un nombre cible donnée. A droite bilan final des six tours joués avec les cibles réussies marquées d'une coche verte accompagnées de la solution correcte donnée par l'élève et les cibles échouées marquées d'une croix rouge et accompagnées d'une solution possible.

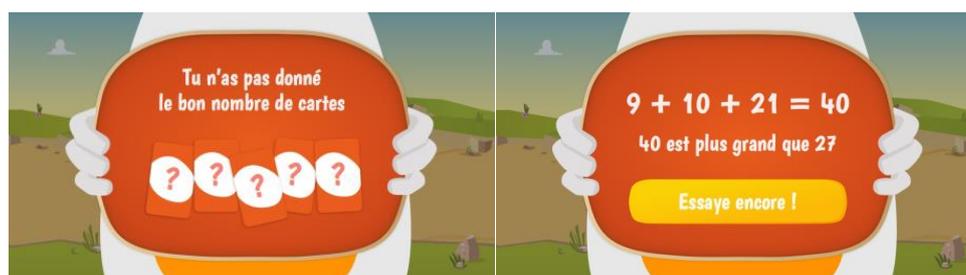


Figure 4. A gauche, rétroaction de stratégie invitant les élèves à reconsidérer le nombre de cartes soumises au robot. A droite, le message compare la solution proposée par les élèves avec la cible.

Les *rétroactions de stratégie* sont les phénomènes produits par le système pour étayer et faire évoluer la stratégie de résolution de l'élève au cours de la résolution de la tâche. Pour produire ce type de rétroaction, le système doit être capable de (i) faire un diagnostic de la stratégie de résolution utilisée, à partir d'informations disponibles dans le système, comme les nombres proposés par les élèves, (ii) déterminer une réponse permettant de faire évoluer cette stratégie, c'est-à-dire disposer d'une analyse didactique relative à cette stratégie, (iii) implémenter cette réponse à travers un affichage, un déplacement, un son etc. Une telle rétroaction peut consister en des messages d'aide ou un effet visuel, mécanique, sur l'interface numérique ou sur les objets tangibles, dont le robot. Ce type de rétroaction

utilise donc les rétroactions de manipulation directe, mais son objectif dans l'interaction avec les élèves est de lui faire modifier sa stratégie en cours, sans toutefois lui indiquer une autre stratégie ou résoudre le problème à sa place. Ce sont les rétroactions les plus fortement didactiques et les plus complexes à concevoir dans un environnement numérique, en particulier un dispositif d'objets connectés. Les difficultés pour les concepteurs se situent aux trois niveaux, celui du diagnostic qui ne peut passer que par les actions de l'utilisateur à l'interface du dispositif, celui de savoir comment répondre à la difficulté diagnostiquée et enfin celui de savoir comment implémenter cette réponse dans le système. Dans le cas du nombre cible, l'analyse didactique disponible permet le diagnostic à partir des nombres sélectionnés par les élèves. Cependant, la réponse à apporter est plus complexe à déterminer. Un choix simple est de rappeler les contraintes du problème qui n'ont pas été respectées (Figure 4, à gauche). Il arrive que les élèves oublient la contrainte du problème d'une solution avec 3 termes et proposent une combinaison de 2 ou 4 cartes. La rétroaction leur signale qu'ils n'ont pas donné le bon nombre de cartes sans leur préciser à nouveau qu'ils doivent associer 3 cartes. La collaboration entre élèves résout souvent cette question, soit au sein du binôme, soit par les échanges hors du binôme et hors du temps de jeu. Actuellement, le système compare également la somme des nombres choisis par les élèves avec le nombre cible. D'autres informations pourraient être données sur les caractéristiques de la solution produite par les élèves. Enfin, il faut également choisir comment signifier cette information à l'interface du dispositif. Actuellement, cet ordre est affiché sur le smartphone et, simultanément, il est représenté sur le plateau par le déplacement du robot avant ou après la cible (Figure 5). L'intérêt de ce choix de rétroaction par déplacement est à l'étude.

Nous avons donc posé aux participants de l'atelier la question des rétroactions de stratégie qu'il serait possible d'implémenter dans le dispositif :

- Comment rendre le déplacement du robot porteur d'une information significative du point de vue mathématique à destination des élèves ?
- Est-il possible d'utiliser le déplacement du robot comme aide à la résolution pour produire un étayage mathématique relatif à la comparaison entre la somme de trois nombres proposés par les élèves et le nombre cible visé ?

Au cours de l'atelier, les solutions explorées par les concepteurs du jeu ont été présentées, ainsi que les difficultés rencontrées. Les participants ont alors élaboré de nouvelles solutions.

## 2 Difficultés rencontrées dans la conception des rétroactions du robot

Au cours de la conception, il a été nécessaire de veiller à ce que les diverses rétroactions possibles ne rentrent pas en concurrence et ne contribuent pas à une perte de signification et d'utilité finale pour les élèves. Or cela était le cas de la version du jeu disponible à la date du colloque de la COPIRELEM (juin 2016). En effet, les rétroactions initialement implémentées étaient : une rétroaction lumineuse de yeux du robot (qui s'allumaient d'une couleur verte en cas de bonne réponse et orange en cas d'erreur) et un déplacement. Mais dès que l'élève avait validé la combinaison de cartes soumise au robot, le robot produisait la rétroaction lumineuse au niveau des yeux. Ce n'est qu'ensuite que le robot se déplaçait sur le plateau de jeu vers une position correspondante à la somme des cartes soumises (Figure 5) : si la somme des cartes soumises est égale au nombre cible, le robot se déplace sur la piste jusqu'au drapeau, dans une partie centrale de la piste et du plateau, si elle est plus petite le robot s'arrête avant et si elle est plus grande, il s'arrête après.

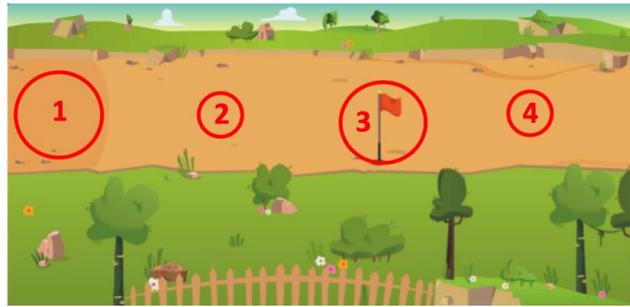


Figure 5. Plateau final du jeu du nombre cible avec l'indication des quatre positions repérées pour le robot : position de départ du robot (1), position (2) indiquant une somme trop petite, position sur le drapeau (3) en cas de bonne réponse et position (4) indiquant une somme trop grande.

Ainsi, dans cette version du jeu, avec la lumière des yeux, le dispositif renvoie à l'élève une première rétroaction qui valide ou invalide la réponse et rend inutile car redondante la rétroaction par déplacement du robot. Après quelques tours, les élèves savent très vite si leur combinaison est correcte ou pas, sans attendre le déplacement du robot. Par conséquent, l'information que le robot apporte par sa position n'est plus prise en compte. Or la rétroaction du dispositif via les yeux du robot, bien que ludique, n'est pas rattachée à un argument mathématique. Il s'agit d'une évaluation de la part du système et pas d'une rétroaction relative à la stratégie mathématique mise en œuvre. Dans une version ultérieure du jeu, la rétroaction des yeux a été différée jusqu'à l'arrêt du robot sur sa nouvelle position pour redonner de l'intérêt à la rétroaction par déplacement.

### 3 Le déplacement du robot

Le déplacement du robot sur le plateau est l'une des rétroactions tangibles du dispositif qu'il n'est pas possible de produire à l'interface de l'environnement numérique. Pour que le déplacement du robot puisse avoir une signification mathématique dans le jeu, la solution la plus évidente semble être celle d'un déplacement proportionnel à la somme des trois nombres sur une droite numérique (représentée ou pas sur le plateau), en direction de la cible. Dans les faits, cela s'est révélé impossible pour plusieurs raisons.

Les déplacements du robot nécessitent un codage du support de déplacement que le robot lit à l'aide de ses capteurs pour connaître sa position et se déplacer d'un point à un autre. Il n'est pas possible par exemple de poser le robot sur le sol d'une grande salle pour des déplacements de grande ampleur, limités par les seules dimensions de la salle. Les concepteurs du jeu ont donc programmé ces déplacements dans l'espace fini et déterminé d'un plateau pouvant tenir sur une table ou un bureau de salle de classe. Sur un plateau, la distance entre la zone de départ du robot et la cible est forcément fixe, dès que la cible est représentée graphiquement.

De plus, le robot mesure près de 11 cm de long, une dimension qu'il est nécessaire de prendre en compte pour rendre visibles ses déplacements. Si le nombre cible est inférieur à 20, la longueur du déplacement attribuée à chaque valeur numérique entre 6 et 20 sera significative et perceptible visuellement. Mais si le nombre cible est proche de 100, la longueur du déplacement attribuée à chaque unité peut être très faible et non perceptible par les élèves, en particulier pour les cibles jusqu'à 100, le dispositif perdant ainsi son sens. Pour que le déplacement du robot soit visible, il faut que les cibles soient petites, ce qui limite trop fortement le corpus de cibles.

Le déplacement proportionnel et continu a donc été abandonné par les concepteurs au profit du déplacement du robot sur seulement quelques positions repérées sur le plateau. La question a donc évolué vers : quel plateau serait pertinent pour donner un sens mathématique au déplacement du robot ?

#### 4 Quel plateau, combiné au déplacement du robot, constituerait un étayage à la réalisation de la tâche mathématique ?

Dans l'état actuel du jeu, puisque le robot est contraint de se déplacer sur quelques positions repérées sur le plateau, les concepteurs du jeu ont cherché quelles seraient les organisations possibles de ces quelques positions qui pourraient avoir un sens mathématique par rapport aux nombres en jeu (nombre cible et sommes) et à la stratégie de résolution de problème des élèves.

##### 4.1 Premiers plateaux du jeu du nombre cible : décor de montagne et six positions distinctes pour le robot

Sur le premier plateau conçu au cours du projet, six positions différentes pour le robot ont été repérées. Ces six positions matérialisent une représentation de la droite numérique sur l'arête de la montagne. Les six positions sont repérées graphiquement sur le plateau par des personnages ou un chalet, à l'exception de la position initiale en bas à gauche (Figure 6). La taille croissante des objets a été choisie pour illustrer l'ordre sur la droite numérique (les nombres sont rangés du plus petit au plus grand). Ainsi selon la position du robot, l'information sur la somme des nombres présents sur les cartes est la suivante : la position initiale (zone 1) lorsqu'aucune carte n'est soumise, position sur la marmotte (zone 2) lorsque la somme est trop petite et éloignée de la cible, position sur le mouton (zone 3) lorsque la somme est trop petite mais proche de la cible, position sur le chalet au soleil (zone 4) lorsque la somme est égale au nombre cible, position sur le bonhomme de neige (zone 5) lorsque la somme est trop grande mais encore proche de la cible, position sur le yeti (zone 6) lorsque la somme est trop grande et éloignée de la cible.

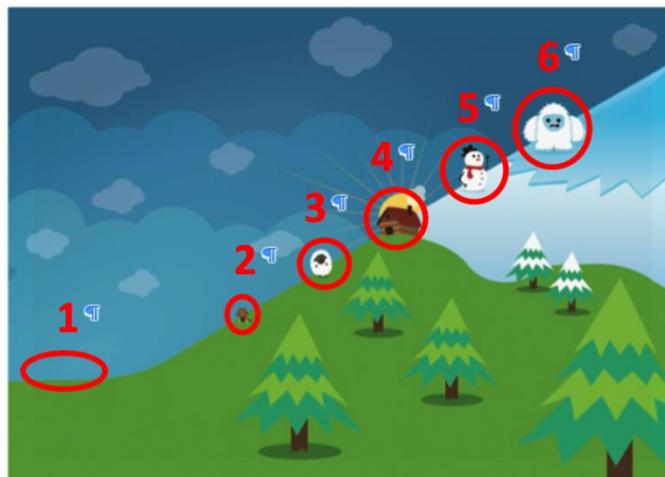


Figure 6. Premier plateau du jeu du Nombre cible. Décor de montagne et six positions possibles pour le robot : au départ dans la plaine (1), sur la marmotte (2), sur le mouton (3), sur le chalet au soleil (4), sur le bonhomme de neige (5) et sur le yeti (6).

En raison de problèmes d'impression du plateau, le robot ne parvenant pas à lire le codage du plateau, ce plateau n'a pas pu être testé tel quel dans les classes. Un plateau remanié, plaçant les personnages à l'horizontale, a été utilisé pour une campagne expérimentale qui a révélé que les élèves ne comprenaient pas la signification des positions du robot sur le plateau (Mandin et al., 2016). Ils voulaient tous atteindre le yeti.

##### 4.2 Plateau du jeu du nombre cible : décor de mini-golf et quatre positions distinctes pour le robot

Avec le troisième plateau créé au cours du projet (Figure 5), quatre positions pour le robot ont été distinguées : position de départ du robot (1), position (2) indiquant une somme trop petite, position sur le drapeau (3) en cas de bonne réponse et position (4) indiquant une somme trop grande. Seule la position correspondant à la bonne réponse, signifiant que la cible est atteinte, est graphiquement explicite et matérialisée par un drapeau. Les expérimentations conduites dans les classes du CP à la 6<sup>e</sup> montrent que le déplacement du robot reste incompris et n'est globalement pas perçu comme significatif mathématiquement. La métaphore du mini-golf ne semble guère plus adaptée que celle de la montagne et présente bien des inconvénients.

Dans les utilisations actuelles du jeu, il faut donc que ce soit l'enseignant de la classe qui s'empare de l'interprétation des déplacements du robot et de la métaphore de la piste de mini-golf pour représenter la droite numérique. Il faudrait ainsi qu'il conduise des bilans pour mettre en relation les observations des déplacements du robot avec les combinaisons de nombres testées par les élèves, afin qu'ils puissent utiliser cette information pour faire évoluer leurs stratégies.

Par ailleurs, des améliorations peuvent être apportées au plateau existant, sans nouvelle impression, au moyen d'indications graphiques écrites sur le plateau : identifier et matérialiser la zone de départ, localiser et nommer explicitement une zone "trop petit" et une zone "trop grand" sur la piste, agrandir la zone cible pour obtenir un espace compatible avec la taille du robot, matérialiser une droite numérique sans indication autre que "trop petit" ou "trop grand" en raison de l'impossibilité de représenter la proportionnalité entre les nombres.

### 4.3 Propositions de plateau par les participants à l'atelier COPIRELEM

Les participants de l'atelier ont retenu la solution de positions identifiées sur le plateau pour surmonter l'impossibilité du déplacement d'une longueur proportionnelle à la distance position de départ-position cible. Ils ont choisi d'associer chaque position du robot sur le plateau (positions fixes pour toutes les parties) à un des nombres sélectionné par les élèves.

Dans la proposition des participants, le robot est une grenouille qui se déplace par bond et qui est initialement posée sur la berge d'une marre. Le nombre cible est représenté par un nénuphar qu'elle veut atteindre. Pour cela, les élèves choisissent trois cartes qui permettent à la grenouille de faire trois sauts. L'objectif est que la grenouille se retrouve sur le nénuphar-cible à son 3<sup>e</sup> saut. Si la somme est trop grande, elle tombe à l'eau au-delà du nénuphar-cible. Si la somme est trop petite, elle tombe à l'eau avant d'atteindre le nénuphar-cible. Les positions intermédiaires de la grenouille sont représentées par des feuilles sur l'eau. Le premier déplacement de la grenouille, sur une première feuille, correspond au premier nombre choisi. Le deuxième déplacement, sur une deuxième feuille, correspond au second nombre et le troisième déplacement sur le nénuphar, ou plouf avant (inférieur au nombre cible) ou plouf après (supérieur au nombre cible) (Figure 7 à Figure 11). Une fois les cartes choisies et validées, le robot-grenouille se déplace en marquant les positions successives. Le robot ne se déplace pas comme sur le jeu actuel d'un seul mouvement. L'intérêt d'un déplacement en trois parties est qu'il peut donner aux élèves des informations sur chaque nombre en rapport avec la cible. Ils pourraient ainsi voir quel nombre (ou quelle somme de nombres) amène le robot au-delà du nénuphar-cible.

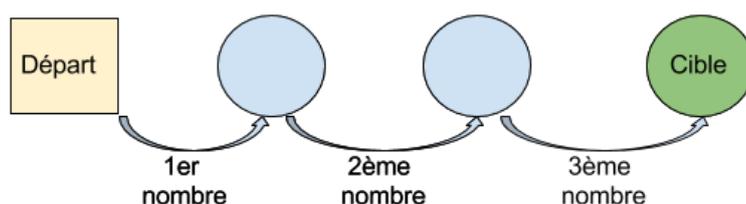


Figure 7. En cas de réussite, chaque position intermédiaire correspond à un des termes de la somme.

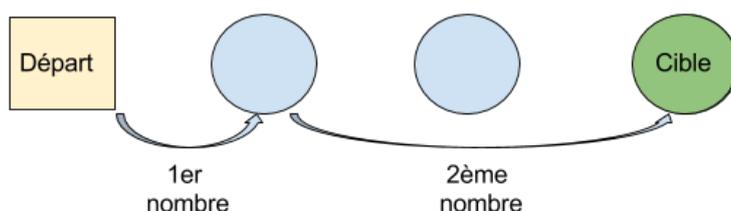


Figure 8. Si les élèves n'ont soumis que deux cartes pour atteindre le nombre cible, le robot atteint la cible. Mais le problème n'est pas résolu car les trois positions n'ont pas été utilisées.

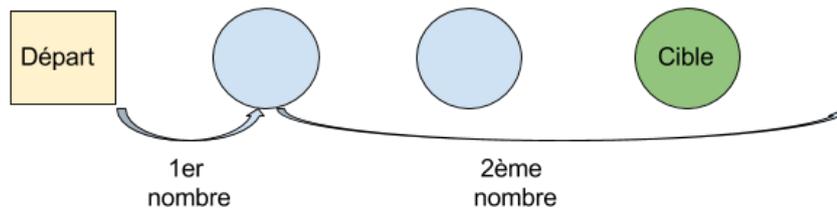


Figure 9. Si les élèves proposent un premier nombre inférieur au nombre cible et un second dont la somme avec le premier est supérieure au nombre cible, la grenouille tombe dans l'eau derrière le nénuphar.

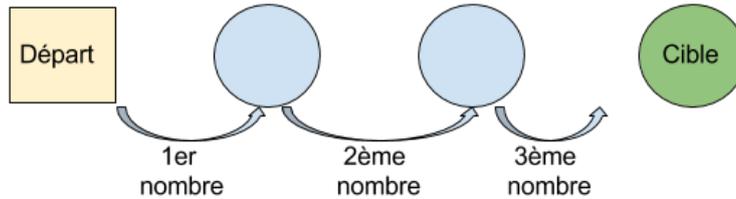


Figure 10. Si les élèves proposent trois nombres dont la somme est inférieure au nombre cible, la grenouille tombe dans l'eau avant le nénuphar.

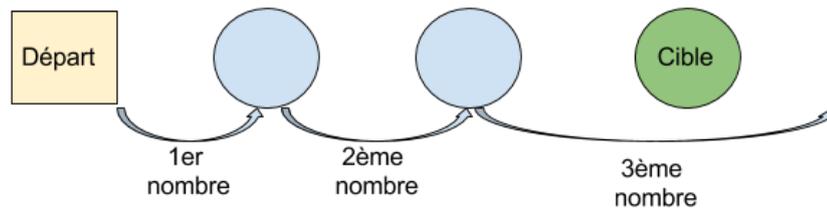


Figure 11. Si les élèves proposent deux nombres dont la somme est inférieure au nombre cible et un troisième dont la somme avec les deux premiers est supérieure au nombre cible, la grenouille tombe dans l'eau après le nénuphar.

Cependant, la proposition des participants ne permet pas de surmonter la difficulté due au fait que les représentations, ici les feuilles ou le nénuphar, sont graphiquement fixes. Ainsi, les élèves peuvent choisir de une à six cartes. Or les positions possibles pour la grenouille ne sont que trois, donc au final chaque bond ne sera pas mis en relation avec un nombre. Par ailleurs, les sauts de la grenouille (déplacement du robot) ont une dimension fixe sur le plateau alors qu'ils représentent des nombres différents, que ce soit d'un tour de jeu à l'autre, ou bien pour le même tour de jeu. En revanche, ce choix matérialise sur le plateau la nécessité des trois termes de la somme.

Une autre limite de la métaphore de la grenouille sauteuse est qu'elle rentre en contradiction avec l'aspect physique du robot ressemblant davantage à un canard ou à un escargot.

D'autres propositions des participants sont :

- Indiquer sur le smartphone ou une tablette, les écarts entre la somme des nombres choisis par les élèves et le nombre cible, par exemple au moyen d'une jauge dont le remplissage est proportionnel à la somme des 3 termes et qui indique avec un repère la position relative au nombre-cible. Cette jauge est complémentaire aux quatre positions fixes sur le plateau (départ, inférieure, égale, supérieure).
- Identifier clairement sur le plateau les quatre positions (départ, avant (ou inférieur...), égale, après (ou supérieur)) et ajouter une flèche sur le plateau pour indiquer un axe.
- Indiquer sur le plateau 5 positions : deux positions avant (inférieur), la cible (égale) et deux positions après (supérieur). Chaque position est associée à un des termes de la somme. Le déplacement du robot se fait pour chaque nombre soumis. Le robot réalise un déplacement par

nombre ce qui permet aux élèves de voir quel nombre fait dépasser la cible. Cette proposition pourrait constituer une aide, offerte par le dispositif après le constat de difficulté.

### 5 Pourquoi vouloir malgré tout un déplacement du robot ?

L'intérêt du déplacement du robot pour le problème mathématique posé par le jeu reste limité voire peu convaincant, au stade actuel du développement de ce jeu. Le déplacement ne constitue pas une rétroaction explicite et compréhensible du dispositif en réponse à une action des joueurs. Ce constat a amené les concepteurs du jeu à proposer un bouton pour désactiver le déplacement du robot pour permettre de jouer alors que les plateaux étaient inutilisables. Ce bouton, présent sur le menu du téléphone, continu d'être utilisé maintenant que les problèmes de plateau ont été résolus.

De fait, dans la version tablette, si le robot et son déplacement n'est pas utilisé, le jeu fonctionne uniquement avec une tablette. Dans ce contexte, il pourrait être tentant de vouloir se passer des autres objets matériels, le robot, le plateau et les cartes car leur gestion matérielle et leur manipulation peuvent être contraignantes, sources de bugs et de mauvaises manipulations. De plus, le travail sur tablettes est suffisamment récent pour qu'il reste très attrayant pour les élèves, comme pour les enseignants, qui pourraient donc être tentés d'aller vers la facilité... matérielle.

Pourquoi dans ce contexte vouloir persister à proposer des jeux utilisant le tangible ? Et parmi les usages du tangible celui du déplacement du robot ?

Manipuler des objets est fondamentalement différent de la "manipulation" de leur image sur une interface numérique. Les interviews des élèves et les parties de jeu filmées montrent qu'environ la moitié des élèves préfèrent la version carte et que les stratégies de jeu développées sont différentes dans les deux environnements (Soury-Lavergne, Guillaume, Rabatel, & Martinez, 2016). Cette étape est nécessaire pour les apprentissages des élèves même si l'on doit également proposer des situations allant vers l'abstraction. Il est indispensable d'articuler ces manipulations de cartes matérielles ou le glisser-coller de nombres sur des interfaces numériques avec la matérialisation d'un déplacement ayant une signification mathématique pour venir renforcer les apprentissages. La difficulté n'en demeure pas moins.

Le jeu Voyage dans le plan dont le développement a suivi celui du Nombre cible, apporte des réponses à cette question de manière plus argumentée. Sans déplacement du robot, le jeu n'existe pas car c'est lui qui rend visibles les actions des joueurs.

---

## IV - CONCLUSION

---

Le projet OCINAE a permis d'initier un nouveau questionnement didactique sur l'articulation du tangible et du numérique dans les situations d'apprentissage des mathématiques. Des pistes ont été explorées avec la création de quatre jeux qui combinent des objets concrets et des outils numériques pour résoudre des problèmes de calcul, de numération et de déplacement dans le plan. Les premiers résultats montrent tout l'intérêt de cette combinaison matériel et numérique, tant du côté de l'appréciation positive des utilisateurs enseignants et élèves que du côté des chercheurs. Une des questions de recherche traitée concerne les rétroactions qui permettent de faire évoluer les stratégies de résolution de problème des élèves au cours d'un jeu. Malgré la multiplicité des possibilités offertes par le dispositif, toute implémentation n'est pas forcément pertinente au regard des mathématiques.

Par exemple, il est difficile de concevoir un déplacement tangible d'un robot qui puisse avoir une signification mathématique dans le jeu du nombre cible. Il faut combiner la cohérence mathématique tout en tenant compte des contraintes matérielles telles que la taille minimum d'un déplacement pour qu'il soit visible. Les solutions qui ont été testées par le projet n'ont pas encore permis d'identifier les solutions optimales et ont même parfois été détournées par les élèves. Les solutions proposées par les participants à l'atelier rencontrent les mêmes difficultés liées à l'interprétation mathématique du déplacement du robot. Elles explorent un autre modèle possible pour le déplacement et utilisent la complémentarité entre le tangible (choix d'un plateau fixe) et le numérique (une jauge dynamique sur smartphone).

Ces constats nous invitent à poursuivre les premières réflexions engagées dans le projet OCINAE pour mieux identifier l'intérêt de dispositifs hybrides pour l'apprentissage et renforcer la complémentarité entre le tangible et le numérique.

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- BROUSSEAU, G. (1998). *La théorie des situations didactiques*. Grenoble: La pensée Sauvage.
- CHARNAY, R., DOUAIRE, J., VALENTIN, D., GUILLAUME, J.-C., & COLOMB, J. (2005). *Apprentissages numériques et résolution de problèmes cycle 2*. Hatier.
- DE SIMONE, M., GUILLAUME, L., & SOURY-LAVERGNE, S. (2016, avril). Monde numérique et monde tangible pour l'apprentissage des mathématiques. *Bulletin de La CFEM Avril 2016*. Retrieved from <http://www.cfem.asso.fr/liaison-cfem/lettre-cfem-avril%202016>
- MACKRELL, K., MASCHIETTO, M., & SOURY-LAVERGNE, S. (2013). The interaction between task design and technology design in creating tasks with Cabri Elem. In C. MARGOLINAS (Ed.), *ICMI Study 22 Task Design in Mathematics Education* (pp. 81–90). Oxford, Royaume-Uni.
- MANDIN, S. (2016, September 21). Apprendre par la manipulation physique grâce aux robots. Retrieved from <https://www.reseau-canope.fr/agence-des-usages/apprendre-par-la-manipulation-physique-grace-aux-robots.html>
- MANDIN, S., De SIMONE, M., & SOURY-LAVERGNE, S. (2016). Robot moves as tangible feedback in a mathematical game at primary school. In *Proceedings of RIE*. Vienne, Autriche.
- RAVENSTEIN, J., & LADAGE, C. (2014). Ordinateurs et Internet à l'école élémentaire française. *Education & Didactique*, 8(3), 9–21.
- RIOU-AZOU, G., & SOURY-LAVERGNE, S. (2015). Mallette d'outils mathématiques, le boulier et la pascaline. In *XXXIe colloque de la COPIRELEM*. Mont de Marsan, France.
- SANCHEZ, E., & MONOD-ANSALDI, R. (2014). Recherche collaborative orientée par la conception. Un paradigme méthodologique pour prendre en compte la complexité des situations d'enseignement-apprentissage. *Éducation et Didactique*, 9(2), 73–94.
- SOURY-LAVERGNE, S. (2016). Duos of artefacts, connecting technology and manipulatives to enhance mathematical learning. Presented at the 13th International Congress on Mathematical Education, Hamburg, Germany: Springer.
- SOURY-LAVERGNE, S., GUILLAUME, L., RABATEL, J.-P., & MARTINEZ, J.-L. (2016). *OCINAE Livrable Tâche 5.4. Analyse des usages pédagogiques du démonstrateur* (p. 109). Institut Français de l'Éducation, ENS de Lyon. Retrieved from [http://educmath.ens-lyon.fr/Educmath/recherche/equipes-associees-16-17/ocinaee/Livrable%205.4\\_OCINAE%20Analyse%20des%20usages\\_V14.pdf](http://educmath.ens-lyon.fr/Educmath/recherche/equipes-associees-16-17/ocinaee/Livrable%205.4_OCINAE%20Analyse%20des%20usages_V14.pdf)
- SOURY-LAVERGNE, S., & MASCHIETTO, M. (2013). A la découverte de la « pascaline » pour l'apprentissage de la numération décimale. In C. OUVRIER-BUFFET (Ed.), *XXXIXe colloque de la COPIRELEM, Faire des mathématiques à l'école : de la formation des enseignants à l'activité de l'élève*. Quimper, France.
- SOURY-LAVERGNE, S., & MASCHIETTO, M. (2015). Articulation of spatial and geometrical knowledge in problem solving with technology at primary school. *ZDM – The International Journal on Mathematics Education*, 47(3), 435–449. <https://doi.org/10.1007/s11858-015-0694-3>
- VOLTOLINI, A. (2014). Un duo d'artefacts virtuel et matériel pour apprendre à construire un triangle à la règle et au compas. *Grand N*, 94, 25–46.