



HAL
open science

Usage d'un robot pour la remédiation en mathématiques

Didier Roy

► **To cite this version:**

| Didier Roy. Usage d'un robot pour la remédiation en mathématiques. 2012. hal-00921444

HAL Id: hal-00921444

<https://hal.science/hal-00921444>

Submitted on 20 Dec 2013

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.

IUFM d'Aquitaine Université Bordeaux IV Université Bordeaux II



RAPPORT DE RECHERCHE

Spécialité **Recherche en Didactique Disciplinaire**

Parcours **Mathématiques/Sciences**

Usage d'un robot pour la remédiation en mathématiques

*Apports de la recherche en didactique aux
interactions robot-élève*

Juin 2012

Didier ROY

Sous la direction de :

Caroline BULF et Lalina COULANGE

Résumé

Les nouvelles technologies sont très sollicitées pour aider les élèves en difficulté scolaire. Les progrès récents de la robotique permettent aujourd'hui d'envisager l'entrée des robots humanoïdes dans ce champ d'application. Cette étude a pour objet de déterminer comment la recherche en didactique peut optimiser l'analyse et l'élaboration de séquences didactiques avec un robot humanoïde.

Plusieurs activités mathématiques gérées par un robot humanoïde sophistiqué ont été proposées à des élèves. Le robot était programmé avec différents scénarios qui pouvaient répondre à différents comportements de l'élève. Chaque activité a été filmée et les résultats des élèves enregistrés puis analysés. L'expérience a été conduite successivement avec plusieurs élèves. Ceux-ci ont apprécié le contact avec le robot, ils ont semblé moins stressés et plus actifs qu'avec un professeur humain. Et ils ont fait des progrès.

L'étude montre que la robotique au service des élèves en difficulté est une voie de recherche intéressante et encourageante. Il est cependant nécessaire de s'outiller afin de garantir la pertinence des séquences produites, pour ne pas manquer l'objectif d'accompagnement des élèves en difficulté. C'est ici que l'apport de la recherche en didactique disciplinaire prend tout son sens.

Abstract

New technologies are increasingly used to help pupils with learning difficulties. Recent developments in robotics lead to bring humanoid robots into consideration. This work study studies like a humanoid robot can help weak pupils to make progress in mathematics.

Several mathematics activities carried out by a sophisticated humanoid robot were proposed to a pupil with learning difficulties. The robot was programmed with scenarios which can respond to many different student acts. Each activity was filmed and the pupil's results were recorded and analyzed. The experiment was carried out successively with several pupils. The pupils liked to play with the robot; they seemed to have little stress and were more active than when working with a human teacher. They made progress.

This study showed that robotics helps pupils with learning difficulties in an interesting and encouraging way. However, it is necessary to have tools to guarantee the relevance of the produced sequences, not to miss the objective of support weak pupils. It is here that the contribution of the research in didactics takes sense.

Sommaire

Résumé	1
Abstract.....	2
Sommaire	3
Introduction.....	5
1. Contexte de la recherche.....	6
1.1 Le projet RASPO.....	6
1.1.1 Le robot dans le projet RASPO.....	6
1.1.2 Les séquences à construire pour le projet RASPO.....	7
1.2 Un questionnaire initial sur le rôle et les contraintes du robot	7
1.2.1 Des contraintes fortes	8
1.2.2 Vers la modélisation	8
1.3 Premiers ancrages théoriques	9
1.3.1 La Psychologie Cognitive	9
1.3.2 Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH).....	9
1.3.3 La Didactique des Mathématiques	10
1.3.4 Les apports de la Théorie des Situations Didactiques (TSD)	11
2. Cadre Théorique et Méthodologie de Recherche	12
2.1 Le Cadre Théorique	12
2.1.1 Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH).....	12
2.1.2 Transposition didactique, Transposition informatique.....	12
2.1.3 Les travaux de G. Lemoine et de T. Assude	13
2.1.4 La Théorie des situations didactiques (TSD)	13
2.2 Des questions de recherche	17
2.2.1 Question naïve de départ.....	17
2.2.2 Questions de recherche	17
2.3 La Méthodologie de Recherche : éléments de méthodologie.....	18
2.3.1 « La course à 20 »	18
2.3.2 « La monnaie des humains ».....	28
3. Corpus.....	41
3.1 L'élaboration des séquences	41
3.1.1 La course à 20 avec NAO	41
3.1.2 La monnaie des humains	50
3.2 Les expérimentations.....	53
3.2.1 La course à 20 : analyse a posteriori	53

3.2.2	La monnaie des humains	67
3.2.3	Le bilan des expérimentations.....	72
	Conclusion.....	74
	Bibliographie	76
	ANNEXE 1 : Descriptif du robot NAO	79
	ANNEXE 2 : Statistiques de la course à 20 selon Brousseau	80

Introduction

Depuis le « Plan Informatique Pour Tous » de 1985, les nouvelles technologies n'ont cessé d'occuper une part grandissante dans l'enseignement, en particulier en mathématiques. À tel point que les logiciels de géométrie dynamique et autres tableurs sont désormais partie intégrante des programmes officiels. Aujourd'hui, la robotique est un secteur en plein développement et des recherches s'engagent dans différentes directions, dont l'aide aux apprentissages. Le travail de recherche que nous présentons ici s'inscrit dans ce mouvement.

Dans l'enseignement, les axes de recherche sont d'une part la programmation de robots pour initier à l'algorithmique et d'autre part l'utilisation de robots pour interagir avec des élèves dans leurs apprentissages. Nous ne traitons ici que du deuxième thème, qui ne semble pas avoir fait l'objet d'études à ce jour.

Notre travail s'appuie sur un projet en cours, RASPO¹, auquel nous participons, qui a pour objet l'étude de l'impact d'un robot humanoïde sur l'apprentissage d'enfants en difficulté en mathématiques, à travers des activités de remédiation programmées dans le robot. Les premiers travaux menés par le laboratoire CHART de Psychologie Cognitive (Université Paris 8) semblent suggérer que l'influence du robot humanoïde utilisé dans le projet est positive, que la relation est plus simple et plus neutre. Ils avancent en particulier que si l'on place l'élève en position de tuteur, le robot étant l'apprenant, cette influence positive s'accroît. La motivation première de l'élève n'est pas d'apprendre des savoirs scolaires, mais d'aider le robot à résoudre des problèmes et à acquérir des connaissances.

Les séquences à programmer dans le robot et destinées à remédier aux difficultés des élèves en mathématiques doivent être construites de manière à être les plus efficaces possibles. Or, les contraintes liées au robot sont nombreuses.

Comment construire des situations didactiques avec le robot malgré les contraintes existantes ?
Pour répondre à cette question, notre intention est de chercher et d'utiliser des outils pour analyser et bâtir les séquences didactiques, pour décrire et étudier les interactions robot-enfant.

Dans un premier temps, nous montrerons comment la nécessité de modèles apparaît lors de l'élaboration de la problématique de recherche. Dans un deuxième temps, nous présenterons le cadre théorique, les modèles retenus et les travaux en lien avec notre recherche, ainsi que la méthodologie de recherche mise en place.

¹ Robot pour l'Accompagnement Scolaire Personnalisé. Projet financé par le Ministère de la Recherche, les sociétés Paraschool et Aldebaran Robotics, l'Université Paris 8 laboratoire CHART Lutin Userlab (Psychologie Cognitive).

1. Contexte de la recherche

1.1 Le projet RASPO

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet de recherche et développement RASPO, qui met en présence un robot humanoïde et un élève en difficulté, âgé de 7 à 11 ans, dans des séquences collaboratives de remédiation. Le robot, nommé NAO, est un des robots humanoïdes les plus perfectionnés au monde (Annexe 1).

L'objectif principal du projet est d'étudier l'impact que peut avoir un robot humanoïde sur la remédiation scolaire.

L'objectif secondaire du projet RASPO est de faire évoluer le robot en fonction des besoins.

1.1.1 Le robot dans le projet RASPO

Dans un premier temps, un adulte prescripteur invite l'élève en difficulté à rencontrer le robot pour effectuer des activités avec lui. Ces activités sont présentées à l'élève selon un scénario ludique : le robot venu d'une autre planète, ignorant des usages terrestres, demande l'aide de l'élève pour comprendre comment vivent les humains en acquérant notamment des connaissances en mathématiques.

Rien n'est dit à l'élève-tuteur sur les séquences programmées dans le robot et destinées en réalité à remédier à ses propres difficultés. En début d'activité, le robot sollicite l'aide de l'élève qui a alors pour mission de lui montrer son savoir-faire sur des notions fondamentales. Si le robot détecte des difficultés, il pose des questions d'apparence naïve afin de permettre à l'élève de préciser ce qu'il ne comprend pas et, si nécessaire, il modifie l'activité en cours pour affiner la remédiation.

Le robot NAO dispose de spécificités et de fonctionnalités adaptées à un usage pédagogique :

- **Design** : aspect enfantin, attrayant et rassurant, avec une petite taille (57 cm) et des lignes douces. Les élèves ont envie de communiquer avec lui.
- **Possibilités de mouvement** : *25 degrés de liberté. Une centrale inertielle. Peut marcher et manipuler des objets légers.* Des mouvements complexes sont possibles (variété des attitudes, marche dans un escalier, danse...).
- **Son** : *2 haut-parleurs. 4 microphones. Un synthétiseur de parole. Une reconnaissance vocale.* Il peut parler en plusieurs langues, enregistrer des sons, jouer des sons (voix et musique). Il peut reconnaître ce que dit l'élève et l'interpréter si un traitement spécifique est prévu.

- **Image** : 2 caméras. Il peut prendre des photos ou filmer.
- **Détection** : 2 émetteurs/récepteurs IR. Un sonar. 9 capteurs digitaux. 8 capteurs de pression. De nombreuses interactions possibles avec l'élève.
- **Communication** : *Ethernet. WIFI. Bluetooth*. Ses capacités de communication lui permettent de se connecter à internet, d'aller chercher des informations, de charger des documents, de communiquer avec un ordinateur, un TBI, une tablette numérique, un Smartphone.
- **Programmation** : *Puissantes possibilités de programmation (c++, Python)*. Il peut faire des traitements assez lourds et exécuter des programmes complexes (calcul formel).

1.1.2 Les séquences à construire pour le projet RASPO

Pour mener à bien l'expérimentation, il convient de bâtir les séquences à programmer.

Les séquences de remédiation à bâtir doivent présenter un aspect ludique et porter sur les connaissances fondamentales de mathématiques de l'école primaire. À travers ces séquences, l'élève est amené à acquérir des connaissances, à les renforcer.

1.2 Un questionnement initial sur le rôle et les contraintes du robot

Le projet RASPO a été sélectionné dans le cadre de l'appel à projets « Serious games » en 2009 par la Direction Générale de la Compétitivité, de l'Industrie et des Services (DGCIS).

Ce projet vise à offrir à des élèves de 7 à 11 ans, éprouvant des difficultés d'apprentissage, un nouveau mode d'accompagnement scolaire personnalisé, reposant sur des interactions ludopédagogiques avec Nao, un robot humanoïde interactif.

Les difficultés d'apprentissage du public concerné peuvent être, notamment, une absence de motivation, un déficit de l'attention, des troubles des fonctions cognitives.

À partir de scénarios prédéfinis, l'élève et le robot confrontent leurs connaissances et effectuent ensemble des exercices. Cette approche privilégie un apprentissage actif et s'appuie sur une analyse fine des erreurs. L'élève est supervisé par un adulte prescripteur (enseignant, éducateur, animateur...).

Selon les sciences cognitives, à travers le laboratoire LUTIN qui participe au projet, la présence du robot humanoïde permet une meilleure attention de la part de l'élève qui est en processus de démotivation.

Sur les dix séquences prévues en mathématiques, une a déjà été écrite et programmée dans le robot : « La monnaie des humains », une séquence de remédiation sur la composition de sommes d'argent en CE2.

Les objectifs du projet sont :

- Étudier l'apport que peut représenter un robot humanoïde dans des situations d'apprentissage.
- Mieux comprendre l'ergonomie robotique (manipulation d'objets par le robot, communication Homme/Robot).
- Développer de nouvelles fonctionnalités techniques pour le robot (ex. : doigt laser, picoprojecteur)

Au-delà de la reconnaissance vocale, dont la robustesse reste toujours un point dur, le projet se propose d'explorer la communication par gestes, la communication non verbale. Ceci demande de lever des verrous en matière de traitement et d'interprétation du signal qui sont encore au stade de la recherche dans le monde scientifique.

Les contraintes fortes liées à la technologie vont suggérer un besoin de modélisation.

1.2.1 Des contraintes fortes

Si les spécificités technologiques du robot peuvent être des atouts pour faire vivre les séquences, il existe des contraintes techniques qui sont autant d'obstacles à prendre en compte. En effet, malgré sa grande sophistication, le robot a des capacités de communication beaucoup plus limitées que celles d'un être humain.

De plus, le robot ne peut pas prendre d'initiative, l'anticipation est obligatoire. Et la prise en compte exhaustive des cheminements potentiels de l'élève est difficile à atteindre.

Envisager une suite d'actions de l'élève et ensuite une rétroaction du robot (voire une discussion avec le robot) serait sans doute une stratégie intéressante, mais elle paraît techniquement difficile à réaliser. Privilégier une suite d'interactions entre l'élève et le robot NAO semble plus accessible.

1.2.2 Vers la modélisation

Si l'expérience de l'enseignement des mathématiques semble suffire pour bâtir les séquences de remédiation, il n'est pas certain qu'elle soit suffisante pour les optimiser.

En effet, une fois réunis, l'élève et le robot ne reçoivent pas d'intervention extérieure. Le robot doit donc avoir été programmé avec une séquence didactique la plus pertinente possible afin de

pouvoir aider l'élève autant qu'il est possible. En particulier, les erreurs doivent être analysées finement afin de prévoir les remédiations adaptées.

La complexité des contraintes est à prendre à compte et les nombreux comportements sont à anticiper. Pour les décrire et les analyser, il semble indispensable de faire appel à des modèles.

En effet, « *modéliser, c'est donner une forme qui permet le raisonnement, le calcul, pour comprendre et décider.* » (Balacheff et Margolinas, 2005, p104).

1.3 Premiers ancrages théoriques

La recherche fournit plusieurs modèles théoriques sur les apprentissages, présentant des outils intéressants pour analyser et construire les séquences didactiques avec le robot.

1.3.1 La Psychologie Cognitive

Nous avons étudié l'apport des sciences cognitives dans la recherche sur les situations d'apprentissage. Nous retiendrons ici les six fonctions de tutelle (Bruner, 1983) que le robot doit assurer lors des remédiations :

- **L'enrôlement** : mise en action de l'élève dans la tâche à effectuer ; définition de l'objectif.
- **La réduction des degrés de liberté** : réduction de la difficulté en simplifiant la tâche.
- **Le maintien de l'orientation** : maintien de la focalisation de l'élève sur la tâche ; maintien de l'élève acteur de son apprentissage sans se substituer à lui.
- **La signalisation des caractéristiques déterminantes** : mise en évidence des informations-clés pour aider l'élève.
- **Le contrôle de la frustration** : encourager, féliciter.
- **La démonstration** : montrer à l'élève comment faire, mais sans faire à sa place. Garder l'élève acteur de son apprentissage.

1.3.2 Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH)

Les travaux sur les EIAH ont également trouvé leur place dans le questionnement initial, apportant un éclairage « informatique » à la problématique, avec notamment les travaux de Balacheff sur « la transposition informatique ».

Un EIAH au sens large est un environnement qui intègre des agents humains (p. ex. élève ou enseignant) et artificiels (c.-à-d., informatiques) et leur offre des conditions d'interactions, localement ou à travers les réseaux informatiques, ainsi que des conditions d'accès à des ressources formatives (humaines et/ou médiatisées) locales ou distribuées.

Tchounikine (2003, p. 235).

Ces travaux font appel à différentes disciplines scientifiques, notamment : l'Informatique, l'Ergonomie, la Pédagogie, la Psychologie Cognitive, la Didactique des disciplines.

1.3.3 La Didactique des Mathématiques

En didactique des disciplines, « *le but des recherches est d'analyser d'une part, la pertinence des savoirs enseignés et d'autre part, les conceptions que se fait l'apprenant sur les connaissances enseignées à partir d'une action didactique du tuteur.* » (Lima, 2006, p. 16)

Nous avons étudié la synthèse (Perrin-Glorian, 2002) des trois théories utilisées majoritairement dans les recherches en didactique des mathématiques développées en France :

- **La Théorie des Champs Conceptuels de Vergnaud** (1996, 1981). Cette théorie met en avant le rôle du professeur qui, en tant que médiateur, choisit les situations et apporte l'aide nécessaire aux élèves dans la résolution de problèmes. La notion de champ conceptuel est entendue comme « *un espace de problèmes ou de situations-problèmes dont le traitement implique des concepts et des procédures de plusieurs types* » (Vergnaud, 1981, p. 217).
- **La Théorie Anthropologique du Didactique de Chevallard** (1992, 1999). Cette théorie met en avant la nature du savoir, qui est enseigné dans le contexte scolaire, et la composante de temporalité. « *Le rapport personnel des individus au savoir se construit dans la temporalité sous l'influence des différents rapports institutionnels auxquels il est soumis* » (Perrin-Glorian, 2002, p. 207).
- **La Théorie des Situations Didactiques de Brousseau** (1986, 1998). Cette théorie met en avant la situation elle-même. « *La situation didactique comprend une situation adidactique qui modélise les interactions de l'élève avec le savoir à travers ses possibilités d'action sur un milieu capable de rétroactions, et un contrat didactique implicite qui traduit les attentes réciproques du maître et des élèves relatives au savoir [...]* » (Perrin-Glorian, 2002, p. 206).

La Théorie des Situations Didactiques étant centrée sur la situation elle-même, ses caractéristiques et ses potentialités d'apprentissage, elle paraît bien adaptée pour mener les premières analyses.

1.3.4 Les apports de la Théorie des Situations Didactiques (TSD)

La TSD permet une modélisation des connaissances, ces mêmes connaissances étant utilisées comme outils de contrôle des situations. L'élève utilise ses connaissances pour agir sur un milieu que l'on suppose isolé du professeur.

L'approche théorique des séquences avec le robot par la TSD est intéressante puisqu'elle permet de réduire le rôle d'un intervenant extérieur, la situation étant conçue pour permettre à l'élève de construire son savoir lui-même lors de sa recherche de la stratégie optimale.

Conçue dès son origine pour modéliser des connaissances mathématiques, la TSD est bien adaptée à la modélisation de séquences de remédiation en mathématiques.

Ces premiers ancrages théoriques nous permettent de définir le cadre théorique et la méthodologie à mettre en œuvre.

2. Cadre Théorique et Méthodologie de Recherche

2.1 Le Cadre Théorique

2.1.1 Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH)

Les EIAH, appelés précédemment EIAO (Enseignements Intelligemment Assistés par Ordinateur), sont étudiés à l'aide des différentes disciplines des sciences humaines et sociales et de l'Intelligence Artificielle.

Les recherches en EIAH, qui ont débuté dans les années soixante-dix, mettent en pratique la modélisation des connaissances de l'apprenant. [...] En amont de la conception d'un EIAH se situe un travail didactique qui aboutit à la construction théorique d'un modèle de l'apprenant. Ce modèle une fois construit peut être implémenté au sein d'un tuteur artificiel. Ainsi, notre travail de modélisation dans le champ de la didactique pourra avoir des répercussions sur l'élaboration d'un tuteur ayant pour objectif l'apprentissage d'une notion mathématique.

(Lima, 2006, p. 16)

On distingue deux types principaux d'EIAH :

- Les micromondes : Les micromondes sont conçus pour permettre à l'élève de construire son propre apprentissage, l'ordinateur n'étant qu'un élément du milieu. Exemples : LOGO, Cabri-Géomètre. (Bellemain, 1994)
- Les tuteurs intelligents : les tuteurs intelligents sont prévus pour effectuer un diagnostic de l'état des connaissances de l'élève et pour définir une stratégie à partir de l'implémentation d'un modèle de connaissance d'un répertoire des erreurs d'élèves. Les activités avec le robot concernent cette catégorie.

L'usage du robot entrant précisément dans le cadre des travaux de Balacheff sur « la transposition informatique », ceux-ci sont utilisés pour apporter un éclairage à notre recherche.

2.1.2 Transposition didactique, Transposition informatique

Les travaux sur les EIAH ont trouvé leur place dans le questionnement initial, apportant un éclairage « informatique » à la problématique. Les travaux de Balacheff insistent en particulier sur « la transposition informatique », inhérente à toute ingénierie des EIAH.

La création des objets d'enseignement est issue d'un processus complexe d'adaptation des savoirs de référence aux contraintes d'enseignabilité et d'apprenabilité propres aux systèmes didactiques.

Ce processus, la transposition didactique (Chevallard, 1985), conduit à la création d'objets originaux par leurs caractéristiques et leurs fonctionnements propres. Le développement des technologies informatiques s'accompagnent de phénomènes nouveaux du même ordre que ceux de la transposition didactique.

(Balacheff, 1994, p. 364)

Les EIAH proviennent d'une construction où s'opèrent des transformations nouvelles des objets d'enseignement, le processus mis en œuvre étant la *transposition informatique*.

Dans le cas de l'utilisation du robot humanoïde telle que prévue dans le projet RASPO, cette transposition reste assez limitée. Bien qu'il ne s'agisse pas d'une simple translittération d'un scénario didactique écrit pour être utilisé par un enseignant en séance de remédiation avec un élève en difficulté, l'environnement lié au robot reste sobre, se limitant au robot lui-même et à l'interface visuelle également dépouillée créée pour la tablette numérique connectée au robot. La transposition informatique est réduite, mais suffisamment présente pour qu'elle soit prise en compte dans l'analyse des séquences.

2.1.3 Les travaux de G. Lemoine et de T. Assude

Les deux recherches citées ci-dessous ont en commun d'utiliser des contraintes matérielles fortes pour enrichir des situations didactiques.

- « La calculatrice défectueuse », environnement informatique conçu par G. LEMOINE (2005) : des touches sont bloquées, l'élève doit contourner cette difficulté pour effectuer certaines tâches demandées.
- « La racine carrée », situation créée par T. ASSUDE (1989) : un robot effectue les calculs que lui demande l'élève, mais ce robot ne connaît que les quatre opérations. Comment lui faire calculer racine de 256 puis racine de 7 ?

Ainsi, ce qui peut apparaître dans l'usage du robot comme une limitation de son potentiel didactique nécessite d'approfondir cet aspect afin d'évaluer si ces contraintes techniques ne peuvent pas à l'inverse s'avérer des atouts pour la situation.

2.1.4 La Théorie des situations didactiques (TSD)

Avec la Théorie des situations didactiques, nous disposons d'un outillage solide pour étudier les séquences. Nous explicitons ci-après les principaux éléments qui sont utilisés dans notre recherche.

A. Analyse a priori

C'est la modélisation d'un exercice en terme de situation : recherche des connaissances mises en œuvres dans les stratégies envisageables, évaluation de la pertinence et du coût des procédures utilisées, mise en lumière de la stratégie optimale, identification des variables didactiques. Nous l'utilisons pour analyser et construire les séquences avec le robot.

B. Milieu

Dans la TSD, le milieu est le « *système antagoniste de l'élève* » (Brousseau, 1998). Ce système modifie les états de connaissance et occupe « *un rôle central dans l'apprentissage comme cause des adaptations* » (Brousseau, 1998). Le milieu est composé de tout ce qui agit sur l'élève, tout ce sur quoi l'élève peut agir et tout ce avec quoi il peut agir.

Cet « *apprentissage par adaptation* » (Piaget, 1975) propose que l'élève apprenne en s'adaptant à un milieu qui est porteur de contradictions et de difficultés, etc. Quand il a appris, l'élève retrouve un équilibre dans sa relation avec le milieu.

L'objectif de l'enseignant est alors de proposer à l'élève des situations d'apprentissage qui permettent de provoquer chez lui les adaptations nécessaires pour qu'il apprenne.

L'enseignant n'a pas pour mission d'obtenir des élèves qu'ils apprennent, mais bien de faire en sorte qu'ils puissent apprendre. Il a pour tâche, non la prise en charge de l'apprentissage — ce qui demeure hors de son pouvoir —, mais la prise en charge de la création des conditions de possibilité de l'apprentissage ».

(Chevallard, 1986)

C. Situation adidactique

Une situation adidactique est une situation dans laquelle l'élève interagit avec le milieu en cherchant à résoudre un problème sans qu'il ait au préalable le savoir pour en trouver la solution optimale.

Le maître se refuse à intervenir comme possesseur des connaissances qu'il veut voir apparaître. L'élève sait bien que le problème a été choisi pour lui faire acquérir une connaissance nouvelle, mais il doit savoir aussi que cette connaissance est entièrement justifiée par la logique interne de la situation.

(Brousseau, 1998)

Dans les situations adidactiques, les interactions des élèves avec le milieu sont supposées suffisamment prégnantes et adéquates pour qu'ils puissent construire des connaissances, formuler

des stratégies d'action, valider des savoirs en utilisant les rétroactions de ces milieux sans que leur activité ne soit orientée par la nécessité de satisfaire aux intentions supposées du professeur.

(Sensevy, 2001)

La situation didactique, porteuse du milieu auquel l'élève doit s'adapter, est au cœur de la situation didactique construite et gérée par l'enseignant, et doit répondre à certains critères pour que l'apprentissage de l'élève puisse avoir lieu :

- L'élève peut être capable de répondre au problème, mais de façon non optimale : sa procédure de base doit s'avérer rapidement incomplète ou inefficace. C'est la recherche d'optimisation qui va produire le nouveau savoir.
- Il y a un milieu qui permet à l'élève de disposer des rétroactions nécessaires pour progresser dans sa recherche de la procédure optimale.
- L'élève peut se confronter autant de fois que nécessaire au problème afin d'envisager des stratégies différentes.

D. Variables didactiques

Les variables didactiques sont des paramètres qui permettent d'ajuster une situation didactique, en la simplifiant ou en la complexifiant, pour susciter des adaptations, des changements de stratégie, afin de construire un savoir.

E. Contrat didactique

Le contrat didactique est composé de :

l'ensemble des comportements de l'enseignant qui sont attendus de l'élève, et de l'ensemble des comportements de l'élève qui sont attendus de l'enseignant... Ce contrat est l'ensemble des règles qui déterminent explicitement pour une petite part, mais surtout implicitement, ce que chaque partenaire de la relation didactique va avoir à gérer et dont il sera, d'une manière ou d'une autre, comptable devant l'autre.

(Brousseau, 1986)

Le contrat didactique caractérise les règles régissant les interactions entre l'enseignant et l'élève, règles qui évoluent selon une négociation implicite. « Cette négociation produit une sorte de jeu dont les règles provisoirement stables permettent aux protagonistes et notamment à l'élève de

prendre des décisions dans une certaine sécurité, nécessaire pour lui assurer l'indépendance caractéristique de l'appropriation ». (Brousseau, 1986)

Le contrat didactique est nécessaire pour que la situation didactique existe. Il permet aux élèves de savoir dans quel cadre ils travaillent et à l'enseignant de reconnaître quand les réponses des élèves témoignent de l'apprentissage.

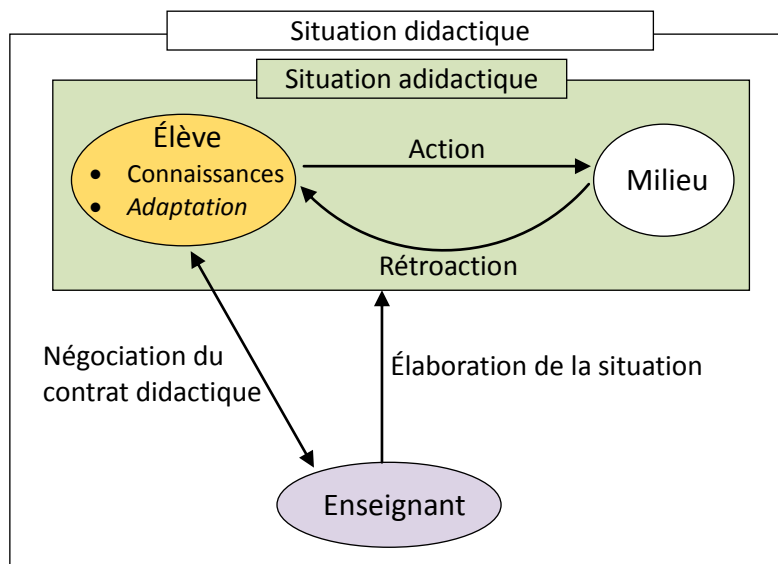


Fig. 1 : Schéma d'une situation didactique

F. Effets de contrat

Les effets de contrat sont des tentatives de contournement de la difficulté d'enseigner. Ce sont des effets induits par le contrat didactique et souvent inévitables. Parmi les plus fréquents :

- Effet Topaze : « *l'enseignant essaie de faire en sorte que le sens de la réponse soit le plus riche possible. En cas d'échec, il ajoute des informations réductrices du sens, jusqu'à accepter des conditions qui provoquent la réponse de l'élève sans que ce dernier ait pu investir le moindre sens.* » (Bessot, 2003, p. 6). L'enseignant suggère la réponse, simplifie la tâche, négocie le contrat à la baisse.
- Effet Jourdain : l'enseignant reconnaît dans la réponse ou le comportement de l'élève l'indice d'une connaissance savante bien que cette réponse ou ce comportement soit motivé par des raisons banales.
- Glissement métadidactique (ou métacognitif) : « *le professeur prend ses propres explications ou ses moyens heuristiques comme objets d'étude à la place des connaissances visées.* » (Brousseau, 1990)

G. Dévolution

Processus sous la responsabilité de l'enseignant par lequel s'opère et se maintient la prise de responsabilité de l'élève et son engagement dans la situation adidactique (comme simple actant).

H. Dialectiques d'action, de formulation, de validation

Selon Brousseau (1998), dans une situation didactique, après la phase de dévolution doivent suivre trois phases où apparaissent les dialectiques suivantes :

- Dialectique d'action : l'élève élabore des stratégies par « dialogue » avec le milieu qui lui apporte informations et rétroactions.
- Dialectique de formulation : l'élève explicite le modèle implicite de ses actions, formule une stratégie.
- Dialectique de validation : l'élève énonce une stratégie dont il faut prouver la pertinence et l'exactitude.

Afin de valider l'intérêt de la TSD pour décrire et analyser les interactions robot-enfant dans une séquence de remédiation, une analyse a priori d'une situation fondamentale est intéressante à réaliser, cette situation étant ensuite transposée pour être gérée par le robot, la nouvelle situation faisant elle-même l'objet d'une analyse a priori.

2.2 Des questions de recherche

2.2.1 Question naïve de départ

Comment analyser et construire des situations didactiques avec le robot sous contrainte de transposition informatique ?

2.2.2 Questions de recherche

Si nous prenons en compte l'environnement d'apprentissage apporté par le robot, les contraintes qui en découlent et que nous pouvons exploiter, éclairées par la Théorie des Situations Didactiques, des questions de recherche se dégagent :

- Comment l'analyse a priori outille-t-elle la réflexion pour élaborer et analyser des séquences ?

- En quoi le robot aménage-t-il le milieu ?
- En quoi les variables didactiques permettent-elles ou non un contrôle de la situation ?
- Comment peut-on analyser les interactions robot/élève en termes de dialectique d'action, de formulation, de validation ?

2.3 La Méthodologie de Recherche : éléments de méthodologie

Deux séquences ont été retenues pour étudier l'influence du robot sur des situations didactiques : l'une à construire à partir du jeu de « la Course à 20 », un classique de la didactique des mathématiques, et l'autre déjà élaborée dans le cadre du projet RASPO, « la Monnaie des Humains ».

Pour la séquence « la course à 20 avec Nao », nous avons préalablement étudié la situation fondamentale voulue par Brousseau (1998), examiné les variantes, puis réalisé une analyse a priori de la séquence produite pendant cette recherche. À partir des expérimentations qui ont suivi, une analyse a posteriori a été effectuée.

Pour la séquence existante « la monnaie des humains » déjà programmée dans le robot, nous avons mené une analyse a priori de la situation afin d'en effectuer une première étude avant les expérimentations. Une fois ces dernières terminées, une analyse a posteriori de la situation a été réalisée.

Nous sommes en présence de deux situations de nature différente. L'une est une situation didactique reposant sur une situation adidactique, l'autre est une situation didactique plus commune.

2.3.1 « La course à 20 »

« Le jeu de la course à 20 » est une situation fondamentale de la TSD (Brousseau, 1998) qui permet une première étude des contraintes liées à l'intégration du robot dans une séquence adidactique.

A. Le principe du jeu

Les règles du jeu sont simples et peu nombreuses :

- Les joueurs proposent des nombres à tour de rôle en ajoutant 1 ou 2 au nombre précédent énoncé par l'adversaire.

- Le gagnant est le premier joueur à dire 20.
- Le joueur qui démarre la partie annonce 1 ou 2 (on part de 0 auquel on ajoute 1 ou 2).

B. La « course à 20 » de Brousseau (1998)

C'est la version initiale, proposée par Guy Brousseau et organisée en quatre phases (Brousseau, 1998) :

- **Phase 1 : Explication du jeu.** Le professeur explique les règles du jeu puis entame une partie avec un élève avant de céder la place à un autre élève. C'est une phase de **dévolution**.

Il y a dévolution quand l'élève s'approprie le problème de manière telle que sa résolution produira la connaissance visée.

- **Phase 2 : Jeu à 1 contre 1** (plusieurs parties). C'est une phase d'**action**. « Faire et ne pas dire ». L'élève joue : il agit sur un système constitué des règles du jeu, de l'adversaire et du dernier nombre dit, il reçoit les informations du milieu qui agit en retour. L'élève joue pour gagner, indépendamment de l'apprentissage visé. Dans cette phase, l'élève élabore des stratégies par « dialogue » avec le milieu, sa représentation du problème évolue, c'est la **dialectique de l'action**.

À cette étape, on peut dire que le sujet est peu à peu modifié par son objet, après le hasard des toutes premières parties qui peut permettre de gagner, le joueur se transforme en sujet curieux de comprendre.

- **Phase 3 : Jeu à une équipe contre équipe** (6 à 8 parties). Au sein de chaque équipe, les membres discutent de la stratégie à adopter. C'est une phase de **formulation**. « Dire et faire ».

Dans cette partie du jeu, les équipes discutent : chaque joueur joue en fonction de la décision élaborée en équipe. Durant cette élaboration, chaque joueur formule une stratégie qui est évaluée : par les joueurs jusqu'à ce qu'elle soit adoptée, par rétroaction du milieu une fois le coup joué. Il y a constitution d'un langage permettant à chaque joueur de comprendre le jeu, de l'analyser, d'énoncer de discuter et de justifier des stratégies.

Dans cette phase, l'élève élabore des formes langagières par « dialogue » avec le système (élève actif, milieu), son modèle de l'action évolue, c'est la **dialectique de la formulation**.

- **Phase 4 : Jeu de la découverte.** Les équipes énoncent des propositions de stratégies gagnantes qui font alors l'objet de débats et de tests pour valider ou invalider chaque proposition. C'est une phase de **validation**. « Dire et ne pas faire ».

Une équipe énonce une proposition (conjecture), l'équipe adverse la prouve ou la réfute (par l'expérience ou par un raisonnement). Le retour à la situation permet d'éviter que les

arguments d'autorité l'emportent sur la preuve. Proposer ou prouver une conjecture vraie, et réfuter une conjecture fausse rapporte des points. Le « dialogue » entre les propositions et les validations d'une part, et les parties jouées d'autre part, améliore à la fois les propositions et les validations.

Dans cette phase, les dialogues conjectures/preuves et milieu/savoirs représentent la **dialectique de la validation**.

C. La « course à n » de Bessot (2003)

Annie Bessot propose une version plus complète de la « course à 20 » : la « course à n » (2003).

Il s'agit pour chacun des adversaires de réussir à dire n le premier, n étant un entier naturel donné, c'est la « longueur » de la course. Le premier qui joue peut dire un entier non nul inférieur à un entier naturel donné p , c'est le « pas » de la course. Ensuite, chacun à tour de rôle annonce un nombre obtenu en ajoutant un entier non nul inférieur à p au dernier nombre annoncé par l'adversaire.

Cette situation peut créer quatre jeux en affectant aux variables n et p des valeurs particulières.

- **Jeu 1 : « La course à 20 ».** Les joueurs proposent des nombres à tour de rôle en ajoutant un entier non nul inférieur ou égal à 2 au nombre précédent énoncé par l'adversaire. Le gagnant est le premier joueur à dire 20. Le joueur qui démarre la partie annonce un entier non nul inférieur ou égal à 2.
- **Jeu 2 : « La course à 27 ».** Les joueurs proposent des nombres à tour de rôle en ajoutant un entier non nul inférieur ou égal à 4 au nombre précédent énoncé par l'adversaire. Le gagnant est le premier joueur à dire 24. Le joueur qui démarre la partie annonce un entier non nul inférieur ou égal à 4.
- **Jeu 3 : « La course à 24 ».** Les joueurs proposent des nombres à tour de rôle en ajoutant un entier non nul inférieur ou égal à 3 au nombre précédent énoncé par l'adversaire. Le gagnant est le premier joueur à dire 24. Le joueur qui démarre la partie annonce un entier non nul inférieur ou égal à 3.
- **Jeu 4 : « La course à 5929 ».** Les joueurs proposent des nombres à tour de rôle en ajoutant un entier non nul inférieur ou égal à 2 au nombre précédent énoncé par l'adversaire. Le gagnant est le premier joueur à dire 5929. Le joueur qui démarre la partie annonce un entier non nul inférieur ou égal à 2.

D. L'analyse a priori de la Course à n.

Quel savoir mathématique pour une stratégie optimale ?

La division euclidienne de n par l'entier $(p+1)$: $n = (p+1) \times q + r$ avec $0 \leq r \leq (p+1)$.

Le nombre de soustractions répétées pour parvenir au plus petit entier est le quotient de cette division et le plus petit entier en est le reste. Le nombre $(p+1)$ que l'on soustrait de façon répétée est le diviseur.

Pour le jeu 1, la division de 20 par 3 a pour reste 2 et pour parvenir à 2 il faut soustraire 6 fois 3.

Pour le jeu 4, la division de 5929 par 3 a pour quotient 1 et le nombre fois où il faut soustraire 3 est $1000+800+100+70+6$, c'est-à-dire 1976.

Quelles variables didactiques pour un apprentissage de ce savoir mathématique ?

- **V1** : n multiple de $(p+1)$ ou non.
 - Si n n'est pas multiple de $(p+1)$, il faut commencer. La suite gagnante est une suite arithmétique de raison $(p+1)$ et de premier terme le reste.
 - Si n est multiple de $(p+1)$, il ne faut pas commencer. La suite gagnante est une suite géométrique de raison $(p+1)$.
- **V2** : n petit ou grand par rapport à p .
 - Si n est petit par rapport à p , il est possible d'écrire tous les entiers de la suite gagnante. Dans ce cas, la stratégie des soustractions répétées de $(p+1)$ est une stratégie optimale au même titre que celle utilisant la division euclidienne.
 - Si n est très grand par rapport à p , la stratégie de soustractions répétées se révèle particulièrement coûteuse, et plus n est grand par rapport à p , plus le coût est élevé. Il devient très difficile de donner toute la suite gagnante. La stratégie des soustractions répétées doit évoluer et devenir une stratégie où apparaît le sens de la division euclidienne : on soustrait à n le multiple de $(p+1)$ le plus grand possible.

Nous allons maintenant nous intéresser particulièrement à la course à 20 limitée à deux partenaires.

En effet, pour étudier en quoi le robot peut intervenir dans la situation, nous allons analyser une même situation avec et sans le robot : la « course à 20 pour deux ».

E. L'analyse a priori de la « course à 20 pour deux »

Quel savoir mathématique pour une stratégie optimale ?

La stratégie de soustractions répétées du nombre 3 convient aussi bien que la division euclidienne de 20 par 3 puisque seules 6 soustractions successives sont nécessaires.

La division de 20 par 3 donne comme reste 2 et pour arriver à 2 il faut soustraire 6 fois 3. Gagne celui qui joue le premier en disant 2, puis 5, 8, 11, 14, 17, 20 (qu'il peut dire quoique dise l'adversaire).

Quelles variables didactiques ?

- **V1 : Nombre de parties jouées.** Plus ce nombre est important, plus l'élève a de chances de découvrir une stratégie victorieuse.
- **V2 : Durée d'une partie.** Plus le temps est limité, plus la possibilité de trouver la stratégie est réduite.

Quel milieu ?

- **Règles du jeu :** les valeurs incorrectes sont rejetées.
- **Résultats des parties jouées :** les résultats des parties successives donnent des informations à l'élève pour valider ou rejeter une proposition. Par exemple, quand l'élève apprend qu'il faut dire 17 pour gagner, cette information lui permet de rejeter 15 et 16 sinon son adversaire pourra dire 17 à sa place. En conséquence, il lui faut dire 14. Cette succession de réactions du milieu lui permet de progresser dans l'élaboration de sa stratégie. La course à 20 devient la course à 17, puis à 14, etc. Surgissent de nouveaux schèmes opératoires, de nouveaux théorèmes-en-acte (Vergnaud, 1983). La régularité des résultats des parties est une propriété importante de ces parties.

Différences entre la « course à 20 pour deux » et la « course à 20 » de Brousseau :

- À l'issue de la phase 2, peu d'élèves auront pu élaborer une stratégie efficace, d'où l'intérêt de la phase 3 du jeu par équipe prévue par Brousseau. Le passage à la dialectique de formulation permet en effet d'enrichir le milieu de points de vue différents et ainsi d'obtenir d'autres réactions afin de progresser vers une stratégie gagnante.

- La phase 3 de la version initiale est ici absente puisqu'il n'y a pas d'équipe au sein de laquelle l'élève peut échanger, confronter ses idées. On peut imaginer qu'une dialectique de formulation naisse entre les deux joueurs concurrents, le jeu prenant alors un aspect collaboratif, mais la motivation portée par l'envie de gagner risque de faiblir.
- La phase 4 de la version initiale est ici d'un intérêt limité puisqu'avec seulement deux points de vue, la dialectique de validation risque de ne pas porter ses fruits.

Comment la substitution d'un des deux partenaires par le robot peut-elle enrichir la situation et en améliorer le potentiel didactique ?

Dans « la course à 20 pour deux », la construction du savoir visé est liée au degré d'expertise des partenaires de jeu. Si les deux joueurs sont trop peu performants dans le jeu, à l'extrême s'ils jouent aléatoirement, la stratégie gagnante risque de ne pas émerger.

- Nous pouvons envisager de définir le niveau de jeu du robot en agissant sur la façon dont il rétroagit sur les actions de l'élève.
- Nous pouvons prévoir un ajustement du niveau de formulation du robot : phrases courtes ou longues, langage simple ou élaboré, indices absents ou nombreux.

Il peut être aussi utile d'intervenir dans le degré de reconnaissance vocale, en créant un dictionnaire de mots et de phrases détectés plus ou moins volumineux.

Nous disposons donc là de plusieurs moyens d'agir sur la pertinence des activités langagières.

- Nous pouvons utiliser le robot pour sélectionner les informations à disposition de l'élève sur les parties déjà jouées. Ainsi, il peut s'agir de réduire le nombre de parties visibles pour ne rendre accessibles que celles qui portent des indices intéressants, ou bien encore de mettre en lumière certains éléments des parties jouées afin de faire émerger des idées chez l'élève.

Nous pouvons prévoir des cheminements différents selon les actions de l'élève et donc définir des stratégies alternatives selon les besoins. Il est possible d'accompagner l'élève de façon plus ou moins forte selon les besoins, par exemple en transformant la course à 20 en course à n, n inférieur à 20, n appartenant à la suite gagnante.

Voyons maintenant comment nous pouvons utiliser l'analyse a priori de la « course à 20 avec Nao » pour faire intervenir le robot de façon efficace dans l'émergence de la stratégie adéquate pour l'élève.

F. L'analyse a priori de la « course à 20 avec Nao »

Quel savoir mathématique pour une stratégie optimale ?

La présence du robot ne change rien à la situation. La stratégie de soustractions répétées du nombre 3 convient aussi bien que la division euclidienne de 20 par 3 puisque seules 6 soustractions successives sont nécessaires.

Quelles variables didactiques ?

- **V1 : Nombre de parties jouées.** Plus ce nombre est important, plus l'élève a de chances de découvrir une stratégie victorieuse. Cette variable est fondamentale, si l'on se réfère notamment au graphique et au tableau (Annexe 2) qui indiquent le nombre de parties nécessaires pour faire émerger les théorèmes en acte. Afin de réduire la durée de la séquence construite autant que possible, cette variable doit être optimisée.

- **V2 : Durée d'une partie.** Plus le temps est limité, plus la possibilité de trouver la stratégie est réduite.

- **V3 : Pertinence de jeu du robot.** On peut intervenir sur la façon de jouer du robot, afin de faciliter ou non l'émergence d'une stratégie chez l'élève.

Dans les premières parties, le robot ajoute 1 ou 2 aléatoirement puis, dans les parties suivantes, s'il arrive à 17 il gagne systématiquement.

- **V4 : Interventions langagières du robot.** On peut choisir ce que dit le robot, donc également le degré d'accompagnement de l'élève.

- **V5 : Aménagement du milieu.** Toutes les parties sont mémorisées par le robot. Celui-ci peut restreindre, ou même pointer spécifiquement, les parties accessibles après coup afin d'accompagner l'élève dans la recherche d'une stratégie. Le but est de diminuer l'incertitude en resserrant l'information disponible.

- **V6 : Régression.** Quand on décale la course à 20 vers la course à 17 puis vers la course à 14, etc., jusqu'où autorise-t-on la régression ? Par défaut, la régression s'arrête à 14, nous ne descendons pas à 8 puis à 5 puis à 2. En résumé, on transforme la course à 20 en course à n , n inférieur à 20, n appartenant à la suite gagnante.

Cette variable permet de doser le guidage de l'activité à ce stade de la réflexion de l'élève.

- **V7 : Compréhension des activités langagières de l'élève.** Malgré une reconnaissance vocale devenue assez fine, le robot n'est pas en mesure d'échanger avec l'élève. Il peut détecter des phrases, des mots-clés, qui peuvent influencer sur les scénarios.

On constate que l'introduction du robot dans la situation permet de renforcer le côté didactique en fournissant des variables didactiques supplémentaires pour moduler la difficulté et proposer des stratégies adaptées.

Quel milieu ?

- **Règles du jeu :** les valeurs incorrectes sont rejetées.
- **Résultats des parties jouées :** les résultats des parties successives donnent des informations à l'élève pour valider ou rejeter une proposition. Par exemple, quand l'élève apprend qu'il faut dire 17 pour gagner, cette information lui permet de rejeter 15 et 16 sinon son adversaire pourra dire 17 à sa place. En conséquence, il lui faut dire 14. Cette succession de réactions du milieu lui permet de progresser dans l'élaboration de sa stratégie. La course à 20 devient la course à 17, puis à 14, etc. Surgissent de nouveaux schèmes opératoires, de nouveaux théorèmes-en-acte (Vergnaud, 1983).

La régularité des résultats des parties est une propriété importante de ces parties.

- Le dernier nombre dit par Nao.

Au contraire de la situation fondamentale définie par Brousseau (1978), nous ne pouvons pas ici proposer explicitement les phases 3 et 4 de la « course à 20 », le jeu se limitant à deux acteurs, l'élève et Nao. Cependant, l'analyse a priori peut nous fournir des pistes pour en combler l'absence, au moins partiellement :

- **Phase 3 : phase de formulation.** Nous pouvons imaginer un « dialogue » entre le robot et l'élève, un dialogue de bas niveau, mais permettant quand même d'aborder la dialectique de formulation, même faiblement.

Par une série de questions-réponses, le robot peut amener l'élève à progresser dans l'élaboration de sa stratégie. Une fois quelques éléments langagiers mis en place, des parties entre le robot et l'élève peuvent permettre à ce dernier d'évaluer l'avancée de sa stratégie, par l'intermédiaire des rétroactions du milieu.

- **Phase 4** : phase de **validation**. Nous pouvons de nouveau construire un « dialogue » entre le robot et l'élève, dans lequel le robot propose des stratégies sur lesquelles l'élève doit se prononcer. Le robot peut également valider ou invalider des propositions de l'élève que celui-ci a choisies dans des QCM.

Il n'est pas indispensable de les dissocier si nettement dans le scénario à construire. La succession des phases d'action, de formulation et de validation telles que décrites par Brousseau ne signifie pas que les dialectiques de la validation, de la formulation et de l'action sont différenciées aussi fortement. Comme le dit G. Brousseau (1998, p. 42) : « *Il est clair de toute façon qu'une dialectique de la validation est elle-même une dialectique de la formulation donc une dialectique de l'action* ». Cette succession met en avant à chaque étape une dialectique particulière, mais elles sont toutes les trois présentes dans chacune des phases.

Ainsi, les dialectiques d'action et de validation de la « course à 20 » de Brousseau ne peuvent pas être considérées comme des phases aussi distinctes.

Par exemple, si pour une affirmation donnée on peut imaginer qu'un contre-exemple puisse être mis en avant par un élève, le statut de ce contre-exemple n'apparaît pas nettement. En effet, on peut imaginer qu'un très mauvais joueur arrivé à 17 perde malgré tout la partie.

Ceci rend complexe la dialectique de la validation de la « course à 20 », parce qu'elle est corrélée à la dialectique de l'action, cette dernière étant elle-même liée au niveau d'expertise du joueur.

Une possibilité de réduire cette complexité est de faire bien jouer le robot, de façon à donner à étudier à l'élève des parcours sans faute. Mais l'élève ne connaissant pas le niveau de jeu du robot, le nombre de parties gagnées par le robot doit être suffisamment élevé pour créer une image d'expert du robot dans la perception de l'élève.

Le risque existe alors que l'élève, ayant acquis la conviction que le robot est expert, cherche à reproduire la suite gagnante des nombres apparaissant à chaque fois que le robot joue une partie en la commençant, l'élève pouvant ainsi passer à côté du savoir à construire. Il peut prendre conscience de la nécessité de commencer, non pas parce que c'est indispensable pour gagner, mais simplement parce ça lui est indispensable pour placer la séquence repérée de coups gagnants.

Si à travers le cheminement de l'élève, le scénario implémenté dans le robot détecte que l'élève ne comprend pas qu'il y a des nombres gagnants, c'est-à-dire qui permettent de gagner quoi que fasse l'adversaire, nous pouvons attirer son attention sur un contre-exemple bien choisi.

Par exemple, nous pouvons lui demander s'il est possible d'affirmer que dire 15 le premier permet d'arriver à 20 le premier. Si son raisonnement ne suffit pas dans un premier temps, nous pouvons suggérer à l'élève d'examiner les parties jouées, éventuellement en ne laissant accessibles que celles qui montrent la non-pertinence de dire 15 pour gagner.

L'utilisation de la variable didactique V6 est intéressante pour faire émerger la stratégie gagnante chez l'élève. Selon les besoins, nous pouvons transformer la « course à 20 » en « course à n », n étant inférieur à 20 et appartenant à la suite gagnante. Par exemple, quand l'élève a reconnu que 17 permet d'arriver à 20, jouer à la « course à 17 » peut lui permettre de poursuivre ces investigations.

Le robot peut stimuler l'élève dans une activité langagière restreinte, mais suffisamment prolifique pour permettre à l'élève de parvenir à la stratégie optimale. La construction du scénario doit faire apparaître des étapes ayant pour fonction de faire émerger les dialectiques de formulation et de validation.

Bien que les phases de formulation et de validation ne favorisent pas l'émergence de nouveaux théorèmes en acte, leur présence est nécessaire pour éviter que les théorèmes en acte déjà mis en lumière ne disparaissent. (Brousseau, 1998). Dans sa présentation « Introduction à l'ingénierie didactique, Esquisse d'un curriculum » (2010), G. Brousseau évoque à ce sujet les résultats de la « Course à 20 » obtenus dans 60 classes. L'annexe 2 montre le « rendement » d'apparition des théorèmes-en-acte en fonction du nombre de parties jouées.

À partir de la 25e partie, s'ils ne sont pas formulés, les théorèmes en acte disparaissent, dans l'ordre inverse de leur apparition.

Dans cette même présentation, G. Brousseau mentionne les conclusions obtenues lors d'une comparaison de deux utilisations didactiques de la « Qui dira 20 ». L'utilisation 1 est conforme à la stratégie prévue par Brousseau. L'utilisation 2 n'inclut pas de temps de formulation ni de validation, l'enseignant dirigeant la découverte et formulant lui-même les explications. L'utilisation 2 offre le jour même de meilleurs résultats que l'utilisation 1. Mais dès le lendemain, les résultats des élèves de l'utilisation 2 chutent alors qu'ils se maintiennent et s'améliorent pour les élèves de la situation 1. Au bout d'un mois, les élèves de l'utilisation 1 ont amélioré leurs résultats, contrairement aux autres. Brousseau suggère que l'autorité de l'enseignant de l'utilisation 2 a une réelle efficacité pour la mémorisation et pour emporter rapidement la conviction des élèves. Mais la conviction transmise s'émousse au fil du temps.

Les élèves de l'utilisation 1 ont mis plus de temps pour forger leur certitude puisque l'enseignant ne leur transmet pas directement, mais ce temps qui semble perdu ne l'est finalement pas.

Nous sommes en présence d'une situation didactique marquée par l'impossibilité d'activités langagières naturelles, mais nourrie par une stratégie de rétroactions assez fine. Cette problématique est emblématique des environnements informatiques d'apprentissage, dans lesquels le robot peut occuper une place intéressante par son aspect humanoïde, sa reconnaissance vocale et sa synthèse de parole, autant d'atouts qui laissent envisager des activités prometteuses.

2.3.2 « La monnaie des humains »

Cette séquence existante propose une activité autour du thème de la monnaie. Elle permet de travailler la décomposition d'une valeur sous plusieurs formes équivalentes, la correspondance entre des expressions d'une même valeur, et, aux niveaux les plus élevés, la décomposition décimale.

Cette séquence peut être réalisée à différents niveaux. Le système ou l'adulte prescripteur décide du niveau d'entrée. Le niveau est ajusté en cours de séquence en fonction des résultats obtenus par l'élève.

À l'issue de l'activité, le système fournit un bilan mettant en avant les points forts et les faiblesses de l'élève et indiquant la rapidité avec laquelle il a répondu aux questions.

La totalité de la séquence est disponible dans l'annexe 4.

Objectif pédagogique de la séquence

- Décomposer une somme en euros, comparer plusieurs décompositions et identifier la plus efficace.

A. Description de la séquence

Le robot Nao demande à l'élève de l'aider à acheter des objets. Pour cela, il va devoir composer des sommes S d'argent correspondant aux prix des objets. L'élève dispose d'une tablette numérique pour glisser et déposer des images de pièces et de billets dans une zone dédiée. Pour valider sa réponse, l'élève doit montrer l'écran de la tablette à Nao et appuyer sur un bouton « OK ».

Si l'élève n'a pas utilisé le minimum de billets et de pièces, il lui est demandé d'optimiser sa réponse. Si l'élève ne répond pas ou réalise plusieurs erreurs consécutives, la tablette donne la solution avant que le système ne passe à la suite. L'élève ne doit pas avoir l'impression que Nao connaît la bonne réponse.

L'activité comprend plusieurs questions correspondant à plusieurs objets à acheter. Les valeurs des sommes S sont générées de façon aléatoire parmi des ensembles ou des intervalles dépendants de l'objet et du niveau de l'activité.

Quatre niveaux sont disponibles, numérotés de 0 à 3 dans l'ordre croissant de difficulté. Suite à l'évaluation diagnostique, le système décide du niveau d'entrée : 1, 2 ou 3. L'adulte prescripteur peut également intervenir sur le niveau d'entrée et choisir éventuellement le niveau maximum que peut atteindre l'élève (par exemple, l'adulte peut vouloir éviter que l'élève n'accède à un niveau trop élevé qui fait appel à des notions pas encore étudiées).

Le niveau maximum est supérieur ou égal au niveau d'entrée et inférieur ou égal à 3. Par défaut, le niveau d'entrée est 1 et le niveau maximum est 3.

Pendant l'activité, les réponses données par l'élève peuvent amener le système à se diriger vers un niveau différent. Deux bonnes réponses consécutives entraînent une augmentation du niveau (si le niveau maximum n'est pas encore atteint). Plusieurs réponses incorrectes consécutives entraînent une diminution du niveau (si le niveau 0 n'est pas encore atteint).

Le niveau 0 est un niveau réservé à la remédiation. Il ne peut être atteint qu'après des échecs dans les niveaux supérieurs. L'activité ne peut pas débiter par le niveau 0.

En cours de séquence, lorsque l'élève a accumulé deux réponses correctes, Nao fait une pause pour remplir son journal de bord. Ce journal de bord pourra ensuite être imprimé et donné à l'élève.

À la fin de la séquence, si l'élève a fourni au moins une bonne réponse, Nao effectue une inversion des rôles : il réinvestit ce qu'il vient d'apprendre en achetant lui-même une chanson téléchargeable. Ceci permet de finir la séquence sur une danse réalisée par Nao.

À l'issue de la séquence, le système génère un bilan détaillé adressé à l'adulte prescripteur. Ce bilan peut être imprimé. Il indique notamment le nombre de réponses données par l'élève, selon le type et la rapidité.

À chaque activité, un objet est choisi aléatoirement parmi une liste d'objets. Il s'agit d'un tirage aléatoire sans remise. La chanson est réservée pour la fin de l'activité.

Le prix est également choisi aléatoirement parmi les ensembles ou les intervalles définis ci-dessous. Le prix correspond à la somme S que devra faire l'élève. Il est décomposé en $S = ES$ euros + CS centimes d'euro où ES et CS sont des nombres entiers.

Ces paramètres sont définis dans le tableau suivant :

Objet		Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
objets choisis aléatoirement	Batterie	ES ∈ {11 ; 12 ; 20 ; 21} CS = 0	ES ∈ [21 ; 50] CS = 0	ES ∈ [10 ; 50] CS ∈ {10 ; 20 ; ... ; 90}	ES ∈ [10 ; 50] CS ∈ [1 ; 99]- {50}
	Tournevis	ES ∈ {2 ; 3 ; 4} CS = 0	ES ∈ {3 ; 4 ; 6 ; 7 ; 8} CS = 0	ES ∈ [3 ; 5] CS ∈ {10 ; 20 ; ... ; 90}	ES ∈ [3 ; 5] CS ∈ [1 ; 99]- {50}
	Panneau solaire	ES ∈ {30 ; 40 ; 50} CS = 0	ES ∈ [30 ; 50] CS = 0	ES ∈ [30 ; 50] CS ∈ {10 ; 20 ; ... ; 90}	ES ∈ [30 ; 50] CS ∈ [1 ; 99]- {50}
	Flacon d'huile	ES ∈ {11 ; 12 ; 20 ; 21} CS = 0	ES ∈ [11 ; 20] CS = 0	ES ∈ [11 ; 20] CS ∈ {10 ; 20 ; ... ; 90}	ES ∈ [11 ; 20] CS ∈ [1 ; 99]- {50}
	Ours en peluche	ES ∈ {11 ; 12 ; 20 ; 21} CS = 0	ES ∈ [11 ; 20] CS = 0	ES ∈ [11 ; 20] CS ∈ {10 ; 20 ; ... ; 90}	ES ∈ [11 ; 20] CS ∈ [1 ; 99]- {50}
	Carte du ciel	ES ∈ {11 ; 12 ; 20 ; 21} CS = 0	ES ∈ [11 ; 20] CS = 0	ES ∈ [11 ; 20] CS ∈ {10 ; 20 ; ... ; 90}	ES ∈ [11 ; 20] CS ∈ [1 ; 99]- {50}
Chanson		ES = 2 CS = 0	ES ∈ {3 ; 4} CS = 0	ES ∈ {3 ; 4} CS ∈ {10 ; 20 ; ... ; 90}	ES ∈ {3 ; 4} CS ∈ [1 ; 99]- {50}

B. Prise en compte de la rapidité des réponses

Le temps de réponse est pris en compte. Une réponse est :

- **rapide** si le temps de réponse est inférieur à T1,
- **lente** si le temps de réponse est supérieur à T2,
- **ordinaire** sinon.

S'il n'y a aucun début de réponse au bout d'un temps T3, il y a **absence de réponse (AR)**.

Niveau	T1	T2	T3
0	10s	40 s	3 min
1	12s	45 s	3 min
2	14s	50 s	3 min
3	14s	50 s	3 min

C. Tablette numérique



Interface visuelle « Monnaie des humains » 1re génération – Fig. 2



Interface visuelle « Monnaie des humains » 2e génération – Fig. 3

La tablette numérique communique en WIFI avec Nao. Elle affiche, pour l'interface de deuxième génération :

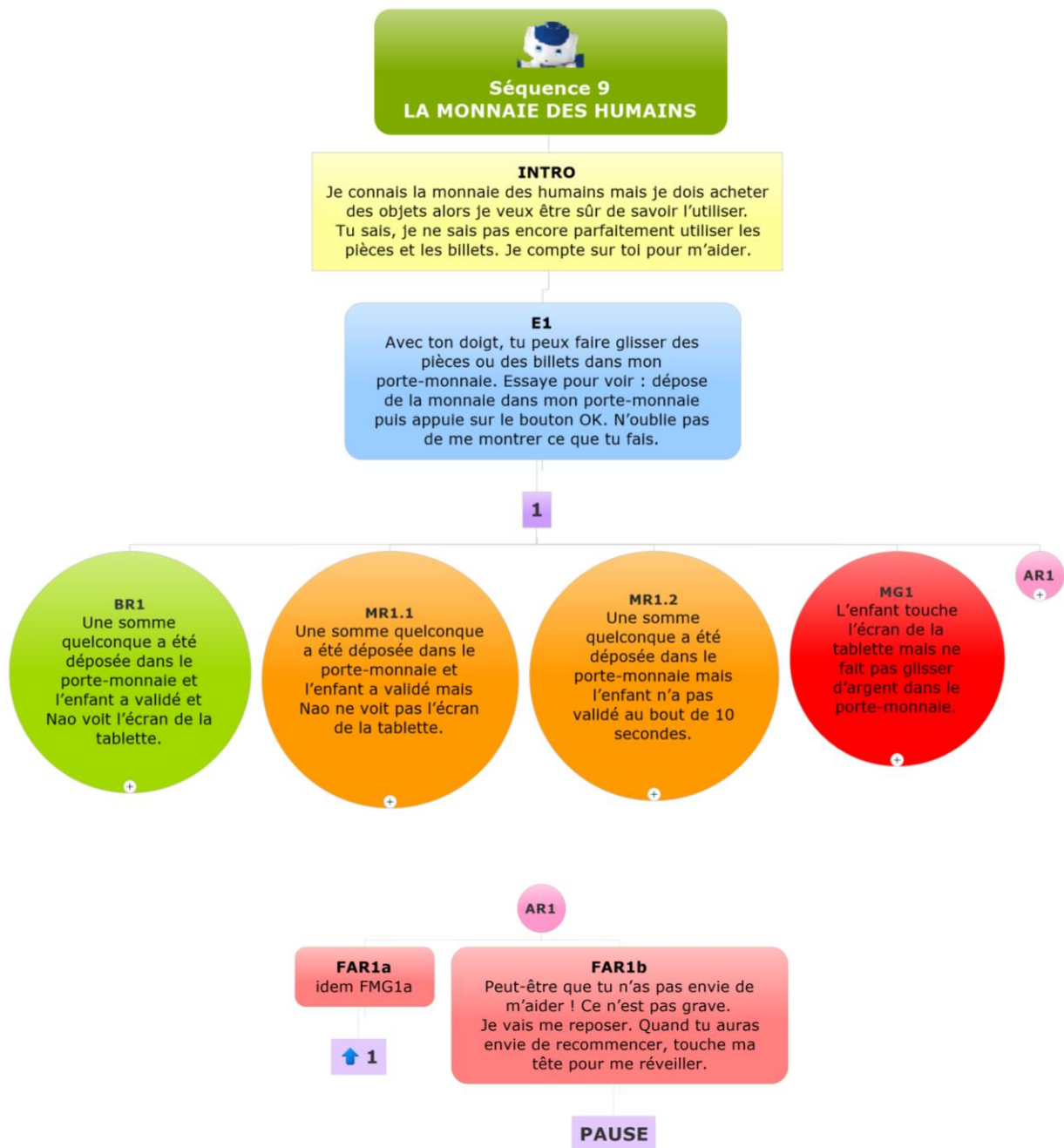
Paramètres d'affichage	Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Compteur totalisant la somme déposée	oui	non	non	non
Contenu de la zone argent déposé : pièces de P € et billets de B €.	P = 1 B = 10	P ∈ {1 ; 2} B ∈ {5 ; 10}	P ∈ {0,10 ; 0,20 ; 0,50 ; 1 ; 2} B ∈ {5 ; 10 ; 20}	P ∈ {0,01 ; 0,02 ; 0,05 ; 0,10 ; 0,20 ; 0,50 ; 1 ; 2} B ∈ {5 ; 10 ; 20}

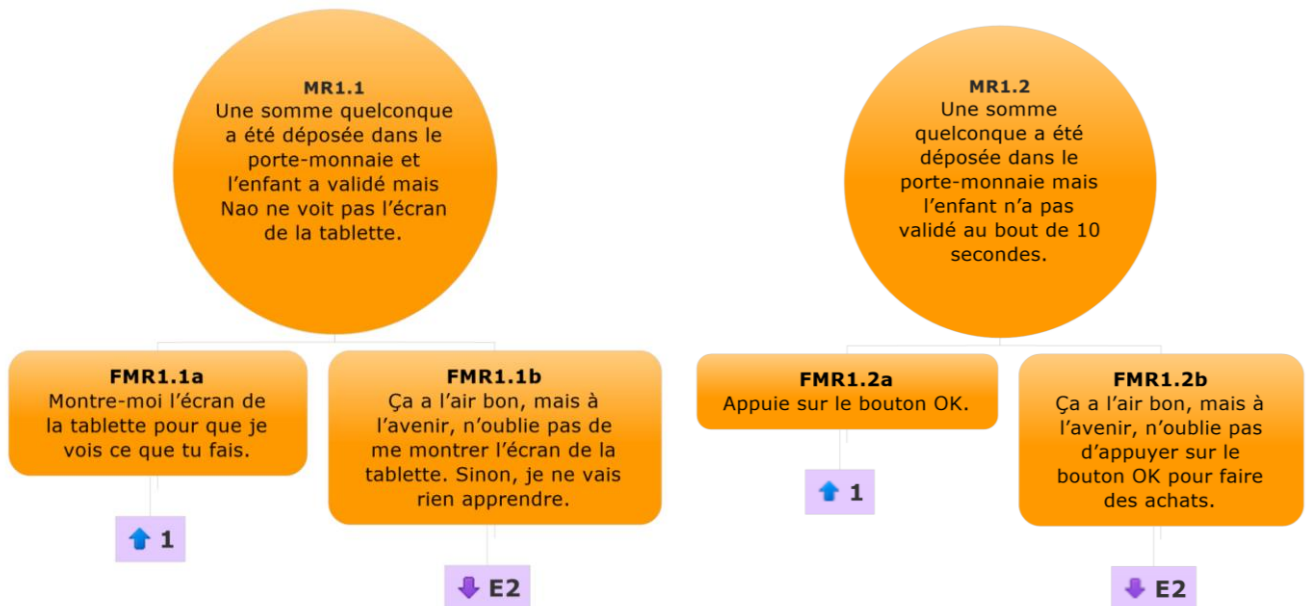
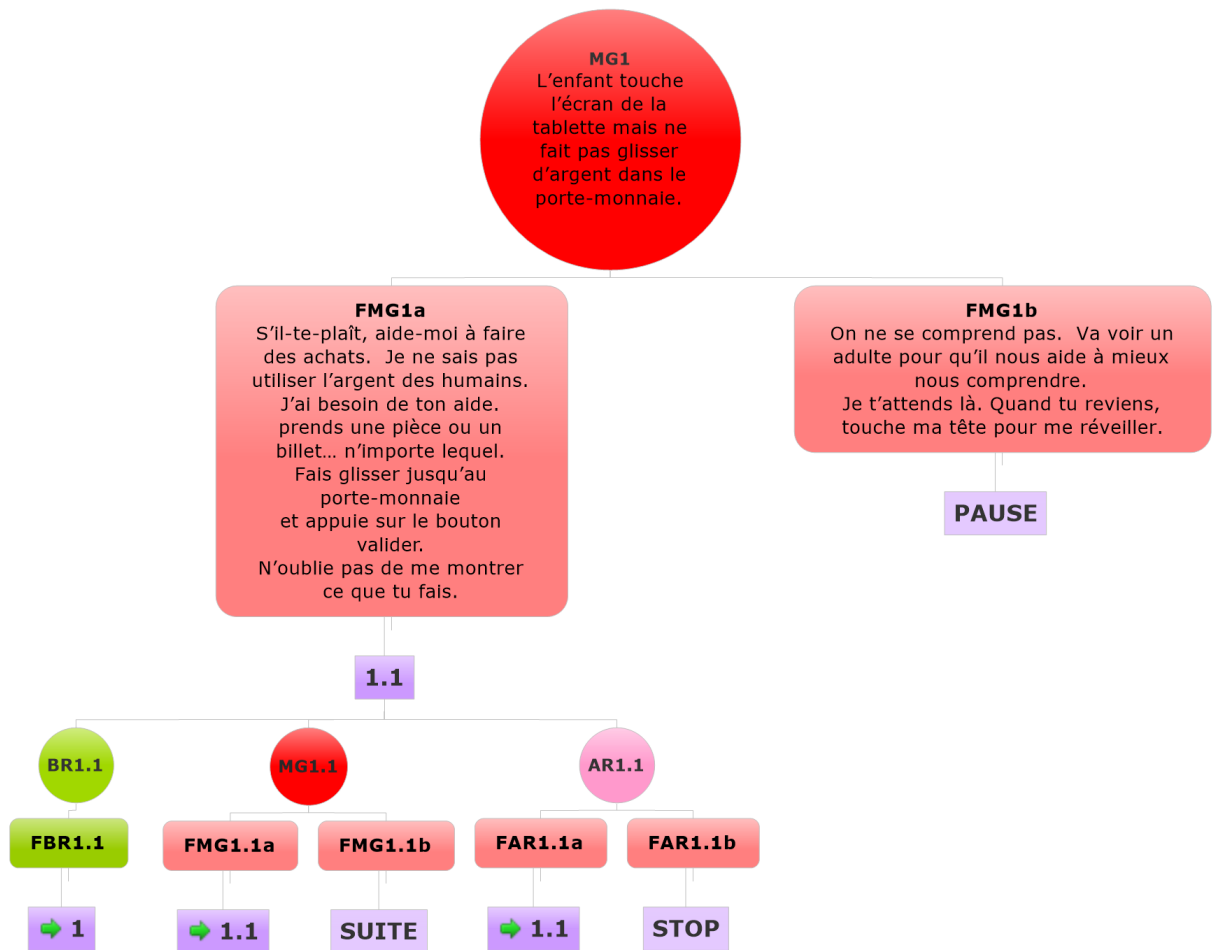
D. Structure de la séquence

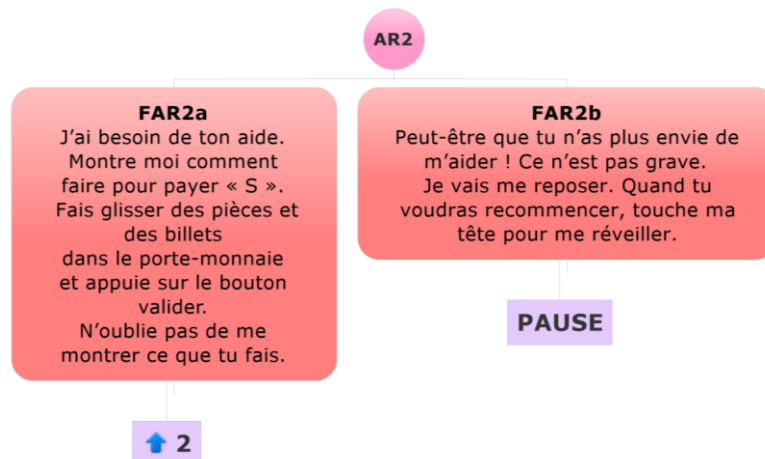
La gestion des niveaux :

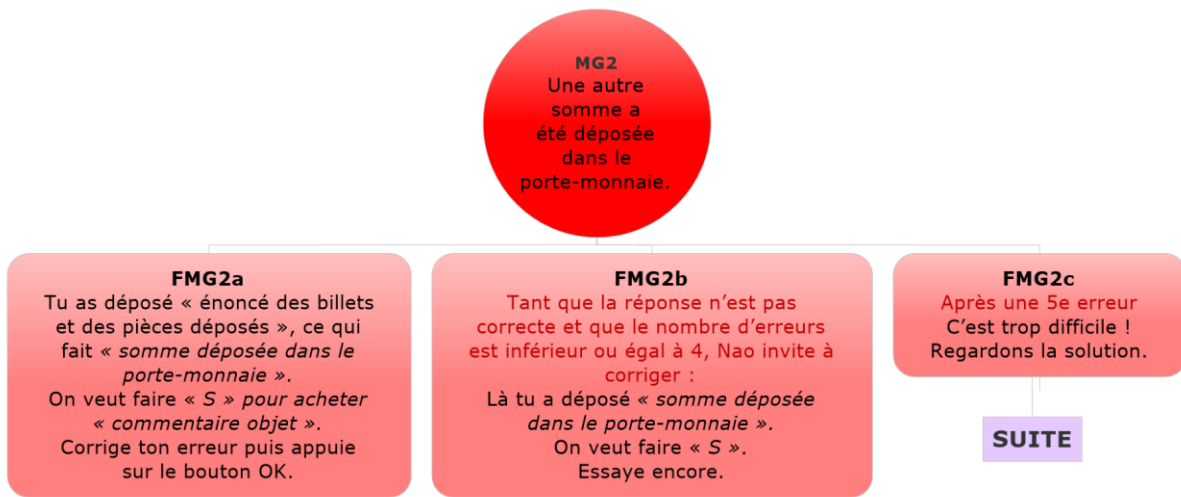
- S'il y a 3 bonnes réponses optimales (le moins de termes possible) consécutives alors on monte le niveau d'un cran.
- S'il y a 4 erreurs consécutives sur une même question alors on baisse le niveau d'un cran.
- S'il y a 2 bonnes réponses (BR2.1 ou BR2.2) qui n'ont pas encore été répertoriées alors on met à jour le carnet de bord.
- Si l'élève a réalisé 6 tentatives (ESSAI = 6) alors on arrête la séquence.
- S'il y a 3 bonnes réponses optimales consécutives et que le niveau maximum n'est pas atteint alors on passe à la suite en traitant la première question du niveau supérieur.
- S'il n'y a pas de bonne réponse après 4 erreurs (FMG2.c) et que le niveau est différent de 0 alors on passe à la suite en traitant la première question du niveau inférieur, sinon on travaille avec un nouvel objet à acheter.

Voici la séquence en quelques cartes mentales :





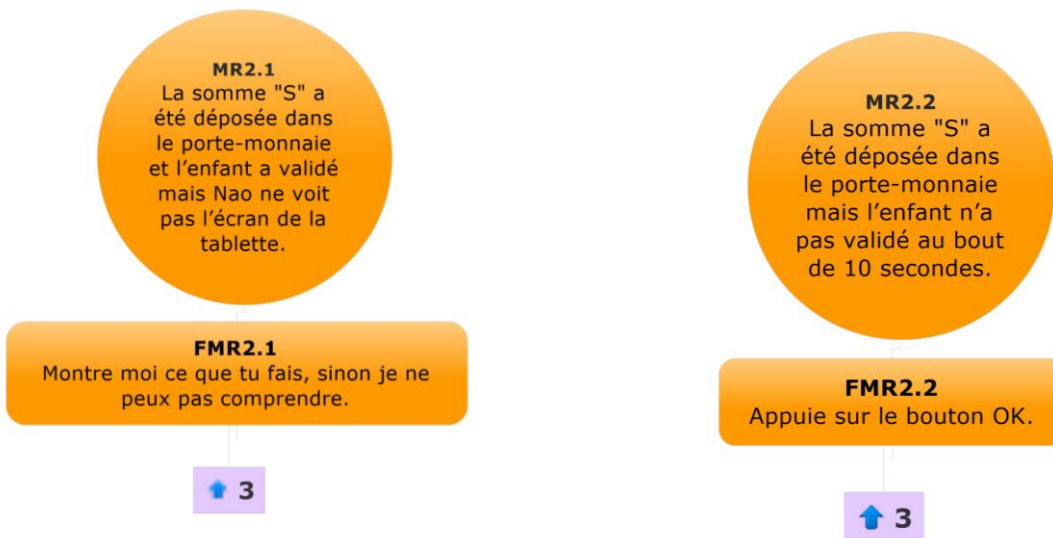




↑ 2

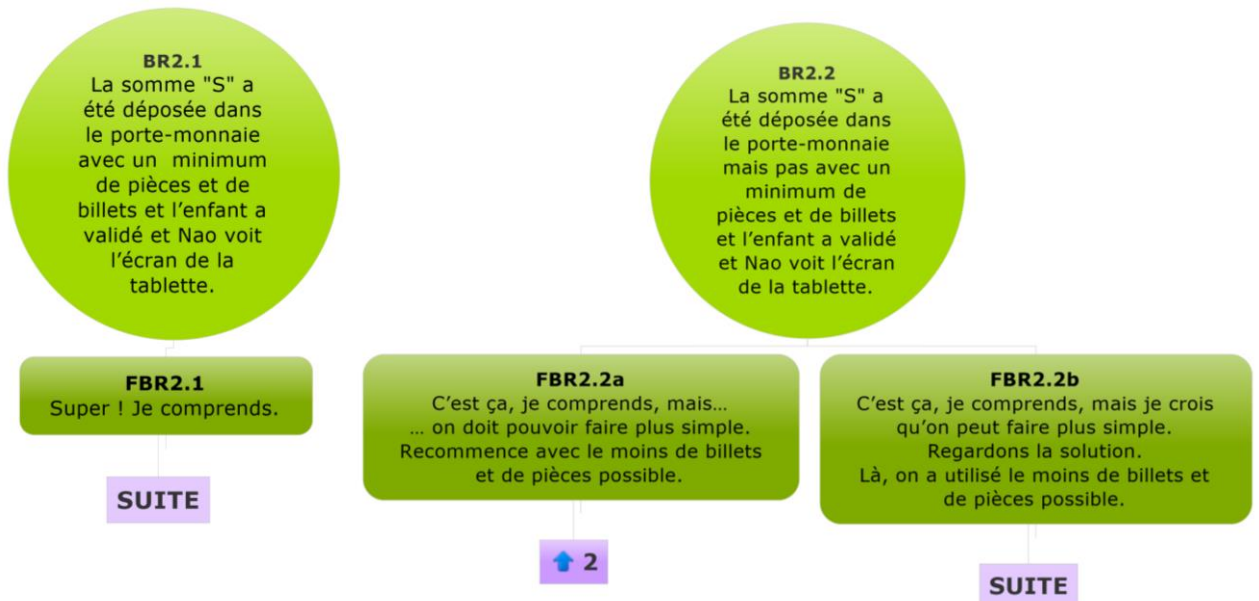
SUITE

SUITE



↑ 3

↑ 3



SUITE

↑ 2

SUITE

E. Analyse a priori de la séquence « La monnaie des humains »

Quel savoir mathématique pour une stratégie optimale ?

Décomposer une valeur, comparer plusieurs décompositions et identifier la plus efficace. Autrement dit, décomposer avec optimisation du nombre de termes de la somme.

Quelles variables didactiques ?

Variables liées à la tâche prescrite

- **V1** : Couple (ES, CS), ES étant le nombre entier d'euros et CS le nombre de centimes d'euros, la somme des deux étant la somme S à composer.
- **V2** : somme composée avec ou sans optimisation, c'est-à-dire en minimisant ou pas le nombre de billets et de pièces.

Variable liée à l'interface visuelle

- **V3** : taille des pièces, affichage nombre à composer, affichage nombre en cours de composition, etc.

Voyons maintenant les procédures possibles pour composer les sommes S. Nous présentons les procédures sur la partie entière ES et les procédures sur la partie décimale CS, même si ces procédures sont très similaires.

Étude des procédures sur ES

- Éléments des procédures de base sur ES :
 - Faire ES par lecture directe de la somme sur l'objet (billet ou pièce).
 - Faire ES avec des 1 ou des 10, par exemple avec la numération : $30 = 10 + 10 + 10$.
- Éléments de procédures plus complexes sur ES :
 - Décomposition sous forme d'additions réitérées : $60 = 20 + 20 + 20$.
 - Décompositions plus élaborées avec recherche d'optimisation du nombre de termes de la somme S donc hiérarchisation des procédures en fonction des contraintes d'optimisation.

Étude des procédures sur CS

- Éléments des procédures de base sur CS :
 - Faire CS par lecture directe de la somme sur l'objet (pièces de 10 cts, 20 cts, 50 cts).

- Faire CS avec des 1 ou des 10, par exemple avec la numération : $30 \text{ cts} = 10 \text{ cts} + 10 \text{ cts} + 10 \text{ cts}$.
- Éléments de procédures plus complexes sur CS :
 - Décomposition sous forme d'additions réitérées : $40 \text{ cts} = 20 \text{ cts} + 20 \text{ cts}$.
 - Décompositions plus élaborées avec recherche d'optimisation du nombre de termes de la somme S donc hiérarchisation des procédures en fonction des contraintes d'optimisation.

Choix des intervalles de valeur pour la variable didactique V1

Certains intervalles définis pour choisir aléatoirement ES ne sont pas pertinents parce qu'ils ne permettent pas d'obtenir des valeurs homogènes dans la difficulté de composition. Or, puisqu'il y a des niveaux de difficulté, cette homogénéité est importante. Certaines valeurs générées peuvent être plus faciles à composer au niveau 3 qu'au niveau 1.

Par exemple : [21 ; 50]. Composer 28 est plus difficile que composer 50 qui peut se faire par lecture directe. Ou : [3 ; 5] . 5 peut se faire par lecture directe, pour 3 il faut composer.

Si les chiffres des dizaines, des unités, des dixièmes et des centièmes sont 0, 1, 2 ou 5, on peut procéder par lecture directe des objets.

Le nombre de combinatoires est influencé par les quatre chiffres choisis. Dans le cas de 0, 1, 2, 5, pour optimiser, il s'agit alors de savoir décomposer une somme de quatre termes d'ordres différents (dizaine, unité, dixième, centième) à lecture directe.

Par exemple, dans le cas d'une somme très simple :

$6 = 5 + 1$ est plus simple à composer que $8 = 5 + 2 + 1$.

Le choix des nombres influençant grandement le coût de la procédure optimale, il doit être effectué avec précision.

Lien entre les valeurs de la variable didactique V1 et le niveau proposé

Le niveau 1 propose des sommes sans centimes et le niveau 2 propose des sommes avec centimes. Ce sont de fausses variables didactiques, certaines sommes entières sont plus difficiles à composer que certaines sommes décimales.

En conclusion, le choix et l'évolution des valeurs de la variable V1 nécessitent de rebâtir le tableau des intervalles de choix aléatoire des sommes.

Prise en compte du temps de réponse

La mesure du temps mis par l'élève pour composer une somme n'est pas pertinente. En effet, optimiser la somme peut prendre plus de temps que composer une somme sans minimiser le nombre de termes. Par exemple, faire glisser 9 pièces de 1 euro peut être plus rapide pour composer 9 euros que faire $9 - 5 = 4$ puis faire glisser 1 billet de 5 euros puis 4 pièces d'1 euro.

Ergonomie de l'interface visuelle de la tablette numérique associée au robot

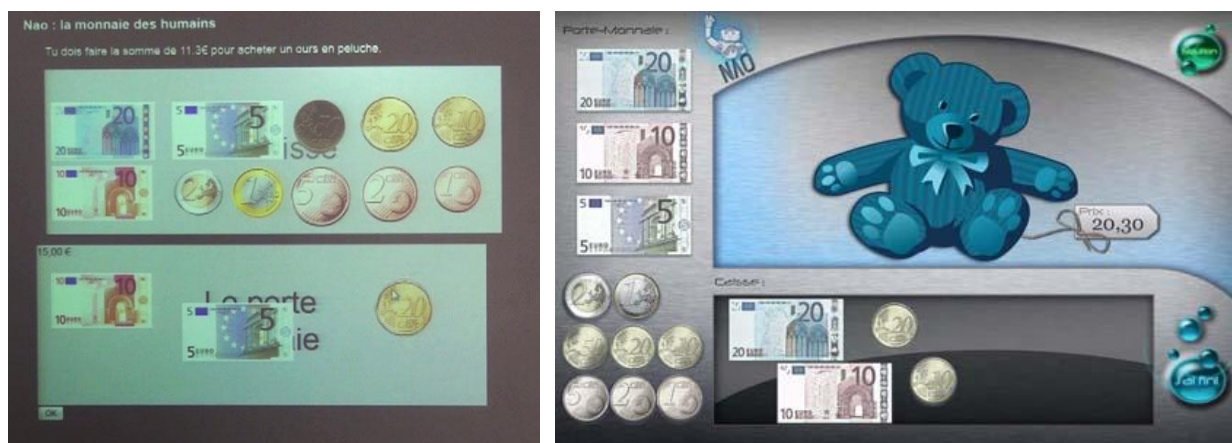


Fig. 5

L'interface de 1re génération est sobre, mais plusieurs éléments peuvent nuire à la stratégie didactique :

- La taille et la visibilité des pièces ne sont pas réalistes et ergonomiques.
- L'affichage permanent de la somme composée par l'élève peut inciter l'élève à procéder par tâtonnement en comparant en permanence les sommes chiffre à chiffre.
- L'affichage de la somme à composer est un effet de la transposition informatique. Il n'était pas prévu dans le scénario initial, la somme était seulement annoncée oralement. De plus, la disparition des zéros inutiles, affichant « 12,6 » au lieu de « 12,60 » modifie la représentation de l'élève. Il y a un décalage entre l'affichage et la somme annoncée oralement.

Convertir 0,6 € en 60 centimes d'euro est très compliqué pour des élèves de CE2.

- La non remise à vide de la zone de réception complique le travail. En cas d'erreur, il lui faut à la fois choisir d'enlever ou de laisser les pièces et les billets qu'il a placés précédemment, mais également en apporter de nouveaux. Rien ne dit qu'il pense à nettoyer la zone avant de recomposer la somme.
- Empilement des pièces qui gêne la lecture.

L'interface de 2e génération (arrivée trop tard pour apparaître dans les expérimentations) est plus élaborée, mais reste sobre, cependant quelques éléments peuvent également nuire à la stratégie didactique :

- La taille des pièces n'est pas réaliste.
- L'affichage de la somme à composer n'était pas prévu dans le scénario initial.
- Le bouton « solution » n'était pas prévu dans le scénario initial.

3. Corpus

3.1 L'élaboration des séquences

3.1.1 La course à 20 avec NAO

La construction de la séquence repose sur l'analyse a priori effectuée au 2.2.1.F.

La séquence complète est disponible dans l'annexe 3.

Variables didactiques retenues et usage :

- **V1 : Nombre de parties jouées.**

Il varie selon le scénario (succession d'étapes) que va suivre l'élève dans la séquence, scénario établi selon ses réponses lors des phases de formulation et de validation.

- **V2 : Durée d'une partie.** La durée n'est limitée que par le temps d'inaction du joueur, afin qu'un élève ne reste pas bloqué dans la séquence. Le délai avant un premier rappel du robot est fixé à 3 minutes. Ensuite, s'il n'y a toujours pas de réaction de l'élève, le robot arrête le jeu en demandant à l'élève de revenir plus tard parce qu'il ne semble pas prêt à faire la séquence pour le moment. Les délais sont suffisamment importants pour que la réflexion de l'élève ne soit pas perturbée par cette considération.

- **V3 : Pertinence de jeu du robot.** Le robot joue au hasard dans les deux premières parties en ajoutant 1 ou 2 aléatoirement puis joue de façon experte dans le reste de la séquence, gagnant systématiquement quand il le peut.

- **V4 : Interventions langagières du robot.** Le robot parle peu, seulement pour rappeler une consigne ou pour susciter une formulation.

- **V5 : Aménagement du milieu.** Toutes les parties sont mémorisées par le robot. L'élève peut les visualiser sur la tablette quand il le souhaite. Cependant, le robot peut pointer telle ou telle partie si le scénario le nécessite. On diminue ainsi l'incertitude en resserrant l'information disponible pour l'élève.

- **V6 : Régression.** On transforme la course à 20 en course à n , n inférieur à 20, n appartenant à la suite gagnante. Ainsi, on accompagne l'élève dans la recherche de la stratégie gagnante. Par exemple, s'il a compris que dire 17 permet d'arriver à dire 20 le premier, quoi que dise l'adversaire alors on joue maintenant à la course à 17. Nous avons arrêté la régression à 14, considérant qu'elle était suffisante pour découvrir la suite gagnante.

- **V7 : Compréhension des activités langagières de l'élève.** Malgré une reconnaissance vocale assez fine, le robot n'est pas en mesure d'échanger avec l'élève. Il peut détecter des phrases, des mots-clés, qui peuvent alors orienter le scénario.

A. « La course à 20 » : rappel du principe du jeu

- Les joueurs proposent des nombres à tour de rôle en ajoutant 1 ou 2 au nombre précédent énoncé par l'adversaire.
- Le gagnant est le premier joueur à dire 20.
- Le joueur qui démarre la partie annonce 1 ou 2.

B. La « course à 20 avec Nao » : généralités

- Lorsque l'élève fait une erreur dans le nombre proposé, le robot la signale et lui demande de rectifier en lui rappelant la règle. Même chose s'il fait une nouvelle erreur. À la troisième erreur, le robot arrête le jeu en demandant à l'élève de revenir plus tard parce qu'il ne semble pas prêt à faire la séquence pour le moment.
- Le délai d'inaction avant un premier rappel du robot est fixé à 3 minutes. Ensuite, s'il n'y a toujours pas de réaction de l'élève, le robot arrête le jeu en demandant à l'élève de revenir plus tard parce qu'il ne semble pas prêt à faire la séquence pour le moment.

C. Organisation d'une partie



Légende :

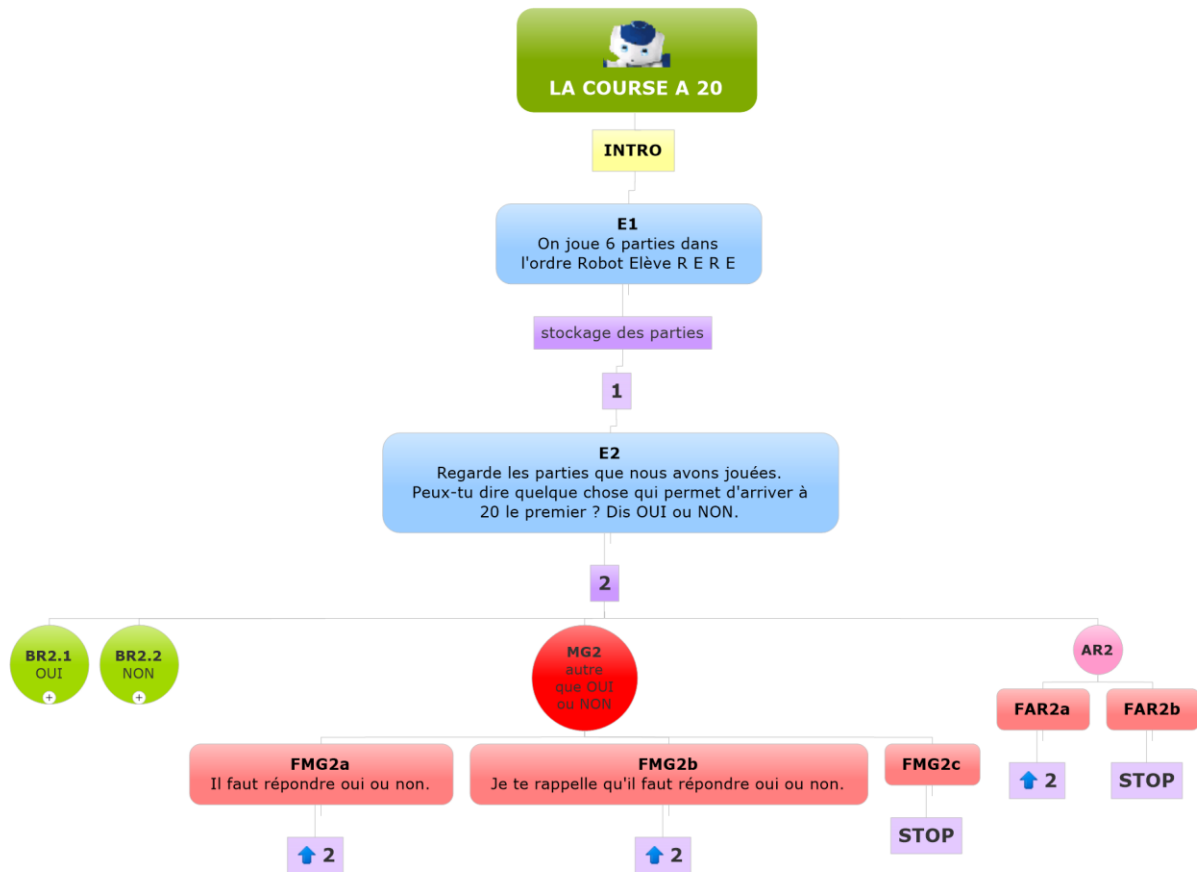
- Ex : énoncé de la xème question.
- BRx : unique bonne réponse à la xème question.
- BRx.y : yème bonne réponse à la xème question.
- MRx : unique mauvaise réponse à la xème question.
- MRx.y : yème mauvaise réponse identifiée à la xème question.
- MGx : mauvaise réponse générale à la xème question.
- ARx : absence de réponse à la xème question.
- Un F précédant une de ces abréviations signifie « feedback ». Par exemple, FBR1.2 : feedback de la 2e bonne réponse à la 1re question.

Pour les feedbacks des mauvaises réponses ou d'absence de réponse, un a signifie qu'il s'agit du feedback lors d'une 1re occurrence, un b désigne une 2e occurrence. Par exemple, FMG2.c : feedback d'une mauvaise réponse générale obtenue pour la 3^e fois à la 2e question.

La séquence complète est disponible dans l'annexe 3.

Étapes 1 et 2 de la séquence

La séquence commence par six parties initiées par le robot, pour lesquelles le robot et l'élève commencent alternativement Robot/Élève/Robot/Élève/Robot/Élève.



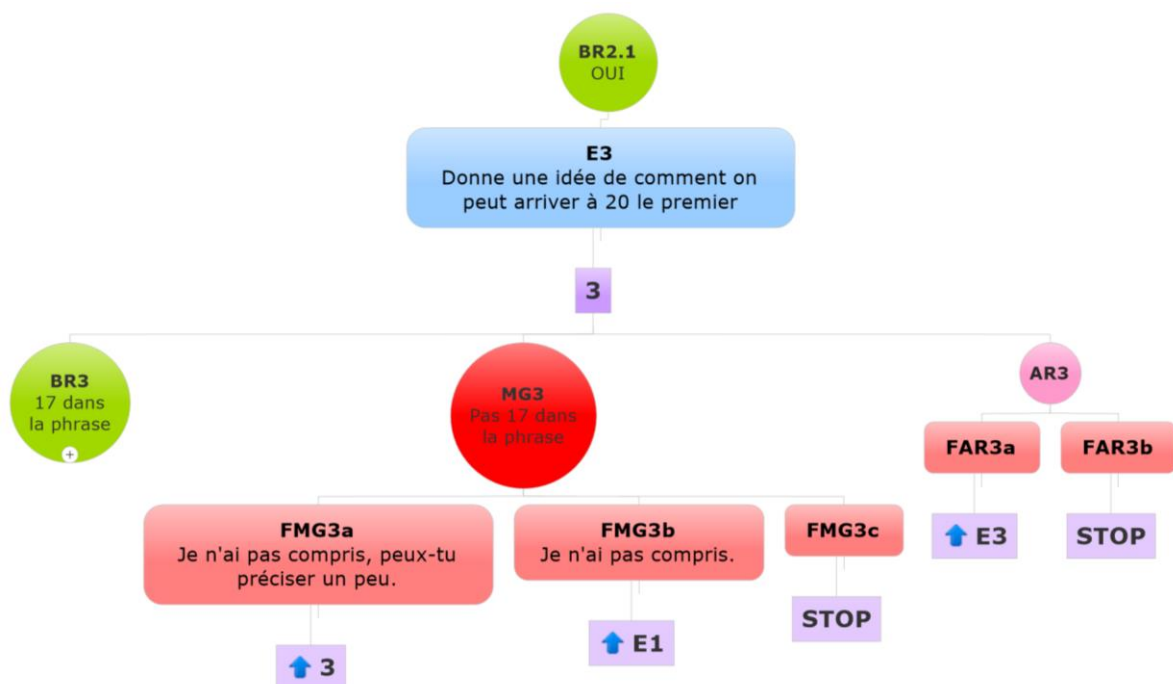
À l'issue des 6 parties, le robot demande à l'élève s'il a remarqué quelque chose pour arriver à 20 le premier.

- Si l'élève répond OUI on passe à l'étape 3.
- Si l'élève répond NON on lui propose un autre chemin pour l'aider à découvrir sa stratégie.
- Si l'élève répond autre chose (MG) on reprecise la question et on lui repose. Si l'élève ne répond pas, on traite son absence de réponse (AR).
- Si l'élève ne répond ni OUI ni NON, on reformule la question autrement puis on teste de nouveau sa réponse.
- Si l'élève ne répond pas au bout de 3 min alors on repose la question puis on teste de nouveau sa réponse. Au 2^e passage en absence de réponse, le jeu s'arrête.

Étape 3 de la séquence

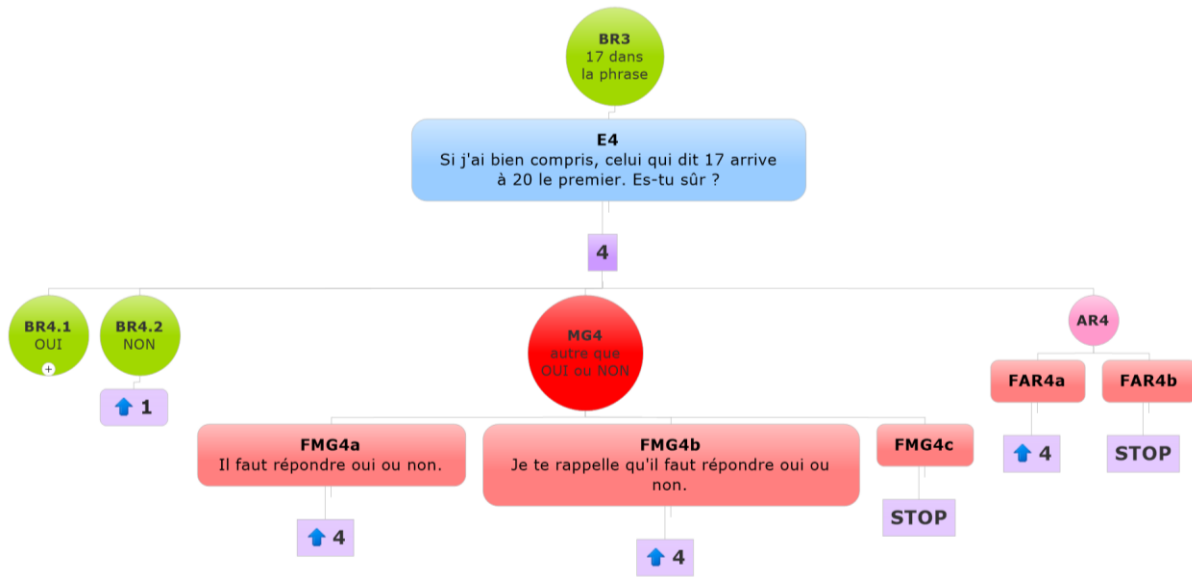
Tentative de phase de formulation : on demande à l'élève d'essayer de dire quelque chose qui permette d'arriver à 20 le premier. La question est assez faible et ambiguë, mais être plus précis pourrait faire craindre un effet de contrat. Par exemple « Y a-t-il un nombre à dire qui permet d'arriver à 20 le premier à coup sûr ? » serait plus clair pour l'élève mais suggère une méthode pour déterminer la stratégie gagnante. Une solution à cette difficulté pourrait être de solliciter davantage la reconnaissance vocale du robot afin d'enrichir ce qu'il peut détecter, et également d'étoffer le dialogue en ajoutant des étapes de « discussion » du type « Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier ? Oui ou non ? », si oui on demande « Qu'utilises-tu pour arriver à 20 le premier ? Essaie de le dire en un mot » et on attend « nombre » « phrase » « calculs » etc...

Nous avons choisi de détecter la présence de « 17 » dans la formulation et de la traiter dans l'étape 4.



Étape 4 de la séquence

Tentative de phase de validation : on demande à l'élève de valider ou non le théorème « 17 ».



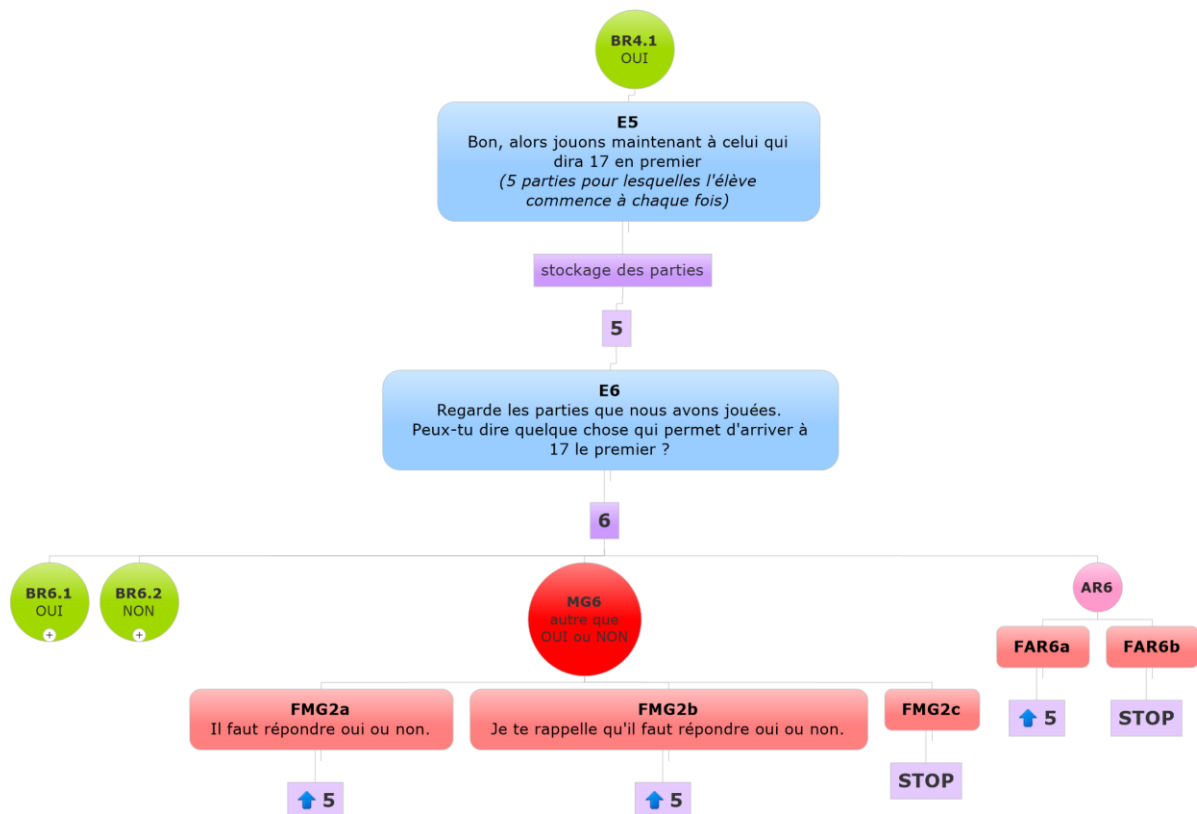
Étapes 5 et 6 de la séquence

Elles sont destinées à accompagner l'élève dans sa découverte de la suite des nombres gagnants.

Après avoir joué 5 parties pour lesquelles il commence à chaque fois, il est demandé à l'élève s'il a remarqué quelque chose.

L'étape 6 est une tentative de formulation : on demande à l'élève d'essayer de dire quelque chose qui permette d'arriver à 17 le premier. Comme dans l'étape 3, la question est assez faible et ambiguë, mais être plus précis pourrait faire craindre un effet de contrat. Par exemple « Y a-t-il un nombre à dire qui permet d'arriver à 20 le premier à coup sûr ? » serait plus clair pour l'élève mais suggère une méthode pour déterminer la stratégie gagnante.

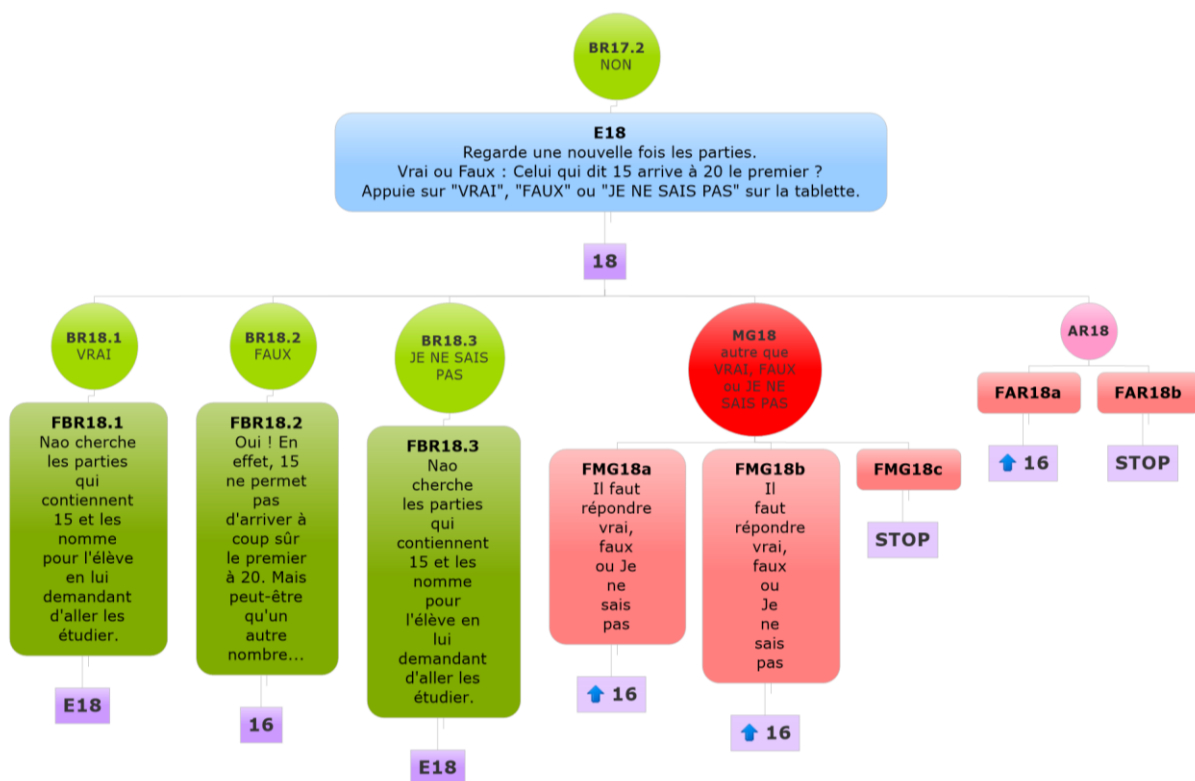
Nous avons choisi de détecter la présence de « 14 » dans la formulation et de la traiter dans l'étape 7 non explicitée ici.



Étape 18 de la séquence

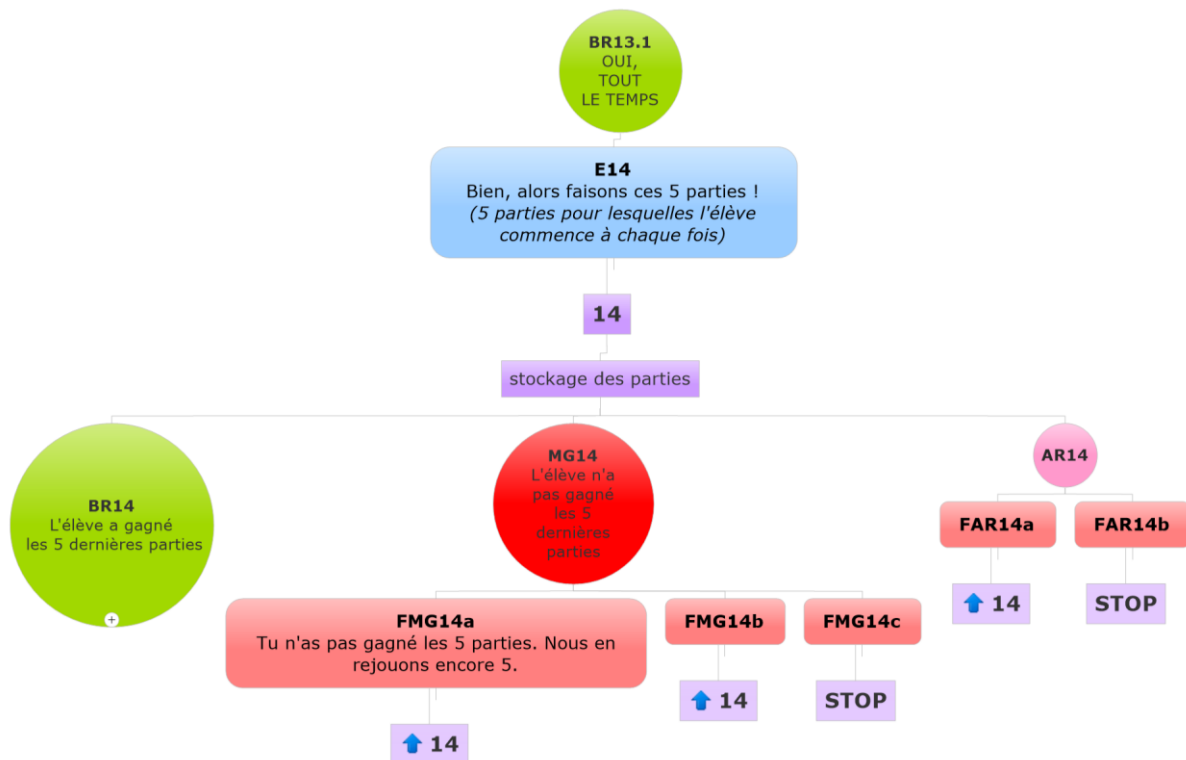
Si l'élève n'est pas parvenu à identifier un début de stratégie gagnante, on lui demande si 15 est un nombre gagnant. En faisant s'interroger l'élève sur un nombre perdant, on souhaite le faire basculer dans une dialectique de validation : il doit chercher comment on peut savoir si un nombre est gagnant ou perdant, donc établir des liens entre les nombres dits et ceux à dire pour délimiter le champ des nombres possibles. Si l'élève franchit cette étape avec succès, on peut estimer qu'il saura valider lui-même les propositions de nombres qui lui viendront.

Si l'élève ne sait pas, on utilise la variable V5 d'aménagement du milieu pour pointer les parties qui peuvent susciter la réflexion de l'élève. Pour être complet, il faudrait tester si 15 est présent dans une des parties et si ce 15 a fait perdre le joueur qui l'a dit. Si non, il faudrait peut-être faire jouer d'autres parties jusqu'à faire apparaître le 15.



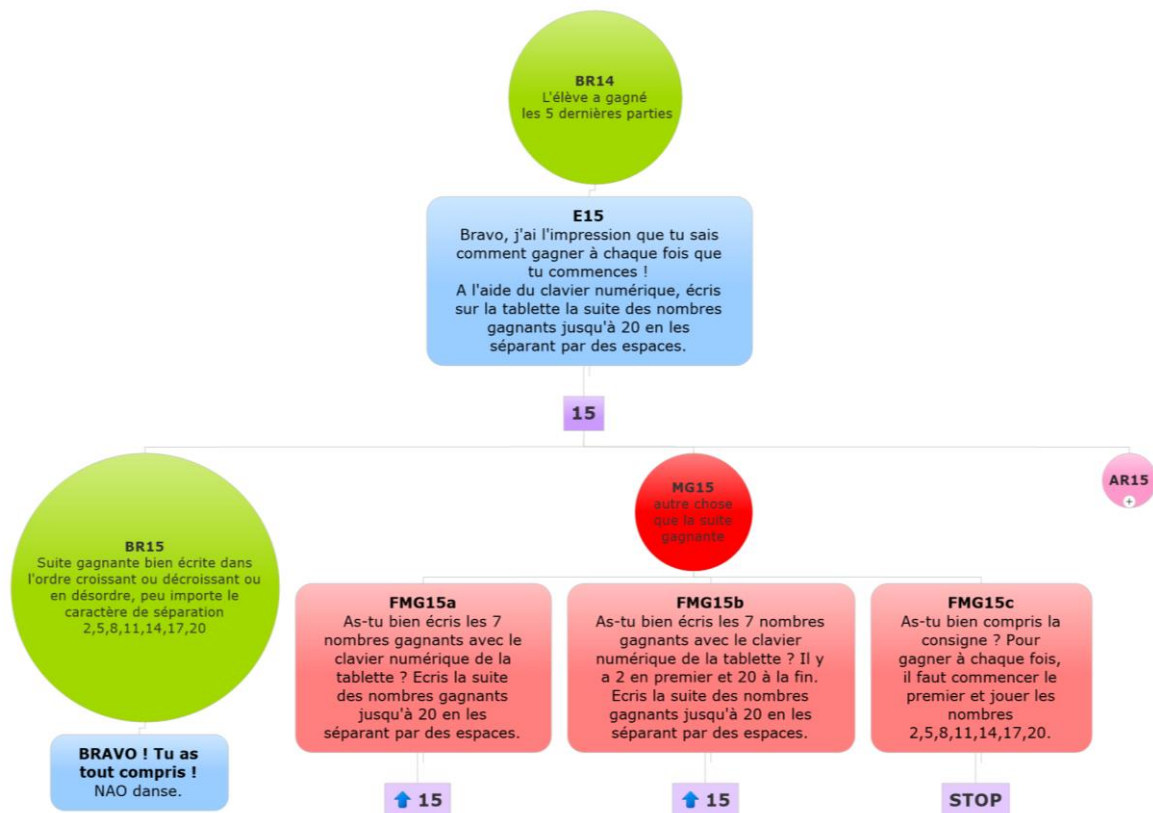
Étape 14 de la séquence

Quand l'élève a identifié les nombres gagnants 14 et 17, qu'il a compris qu'il devait commencer, on lui fait jouer 5 parties dans lesquelles il commence à chaque fois. S'il ne les gagne pas, on lui en fait jouer 5 de plus.



Étape 15 de la séquence

Quand l'élève a identifié les nombres gagnants 14 et 17, on lui fait jouer 5 parties afin qu'il puisse valider la pertinence de sa stratégie.



3.1.2 La monnaie des humains

Après l'analyse a priori de cette séquence existante, nous pouvons proposer divers points d'amélioration afin que les interactions entre le robot et l'élève soient plus efficaces.

Cette séquence propose à l'élève de travailler la décomposition d'une valeur entière sous plusieurs formes, et, aux niveaux les plus élevés, la décomposition décimale. Plus précisément, il s'agit de décomposer en optimisant le nombre de termes de la somme.

Rappel des variables didactiques fournies par l'analyse a priori :

- **V1** : Couple (ES, CS), ES étant le nombre entier d'euros et CS le nombre de centimes d'euros, la somme des deux étant la somme S à composer.
- **V2** : somme composée avec ou sans optimisation, c'est-à-dire en minimisant ou pas le nombre de billets et de pièces.

Rappel des procédures sur ES

- Éléments des procédures de base sur ES :
 - Faire ES par lecture directe de la somme sur l'objet (billet ou pièce).
 - Faire ES avec des 1 ou des 10, par exemple avec la numération : $30 = 10 + 10 + 10$.
- Éléments de procédures plus complexes sur ES :
 - Décomposition sous forme d'additions réitérées : $60 = 20 + 20 + 20$.
 - Décompositions plus élaborées avec recherche d'optimisation du nombre de termes de la somme S donc hiérarchisation des procédures en fonction des contraintes d'optimisation.
- Éléments des procédures de base sur CS :
 - Faire CS par lecture directe de la somme sur l'objet (pièces de 10 cts, 20 cts, 50 cts).
 - Faire CS avec des 1 ou des 10, par exemple avec la numération : $30 \text{ cts} = 10 \text{ cts} + 10 \text{ cts} + 10 \text{ cts}$.
- Éléments de procédures plus complexes sur CS :
 - Décomposition sous forme d'additions réitérées : $40 \text{ cts} = 20 \text{ cts} + 20 \text{ cts}$.
 - Décompositions plus élaborées avec recherche d'optimisation du nombre de termes de la somme S donc hiérarchisation des procédures en fonction des contraintes d'optimisation.

Choix des intervalles de valeur pour la variable didactique V1

L'analyse a priori nous a indiqué que les sommes n'étaient pas homogènes dans un même niveau, et que certaines de niveaux supposés plus élevés étaient plus faciles à composer que certaines sommes de niveaux inférieurs. Nous proposons un nouvel algorithme pour obtenir de nouvelles valeurs qui respectent l'homogénéité dans un niveau ainsi que la progressivité des niveaux eux-mêmes.

Nous proposons également d'ajouter un objet à acheter (nous avons ajouté deux types d'objets à acheter) à chaque séquence de façon à ce qu'il y en ait cinq au lieu de quatre afin que l'élève rencontre un peu plus de combinaisons différentes.

Soient a, b, c et d entiers naturels tels que :

$$ES = 10a + b \quad ; \quad CS = 0,1c + 0,01d \quad ; \quad S = ES + CS \quad \text{avec } S \neq 0$$

Proposition d'un nouveau tableau de valeurs de la variable VI

	Niveau 0	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
	$a \in \{0; 1; 2; 5\}$ $b \in \{0; 1; 2; 5\}$ $c = d = 0$	$a \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$ $b \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$ $c = d = 0$	$a \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$ $b \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$ $c \in \{1; 2; 5\}$ $d \in \{1; 2; 5\}$	$a \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$ $b \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$ $c \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$ $d \in \{3; 4; 6; 7; 8; 9\}$
Batterie	$20 \leq S \leq 50$	$30 \leq S \leq 99$	$30 \leq S \leq 99,55$	$33 \leq S \leq 99,99$
Tournevis	$2 \leq S \leq 12$			
Panneau solaire		$30 \leq S \leq 99$	$30 \leq S \leq 99,55$	$33 \leq S \leq 99,99$
Flacon d'huile	$10 \leq S \leq 20$	$33 \leq S \leq 49$	$33 \leq S \leq 49,55$	$33 \leq S \leq 49,99$
Ours en peluche	$10 \leq S \leq 20$			
Carte du ciel	$10 \leq S \leq 20$			
Fil d'or		$33 \leq S \leq 99$	$30 \leq S \leq 99,55$	$33 \leq S \leq 99,99$
Téléphone		$33 \leq S \leq 99$	$30 \leq S \leq 99,55$	$33 \leq S \leq 99,99$

Prise en compte du temps de réponse

Puisqu'optimiser la somme peut prendre plus de temps que composer une somme sans minimiser le nombre de termes, il faut choisir entre l'optimisation et le temps limité. Nous proposons de garder l'optimisation et de supprimer la prise en compte du temps dans le bilan final.

Ergonomie de l'interface visuelle de la tablette numérique associée au robot

Nous ne proposons ici d'améliorations que pour l'interface de deuxième génération, l'interface de première génération étant désormais caduque.



Suggestions :

- La taille de réception des pièces et des billets doit être beaucoup plus grande. C'est ici que l'élève compose les sommes et il doit être à l'aise pour le faire.
- La relativité des tailles des pièces doit être plus proche de la réalité afin d'éviter des confusions susceptibles de venir perturber l'apprentissage.
- L'affichage permanent de la somme composée est à supprimer même au niveau le plus faible, pour éviter que l'élève procède par tâtonnement en comparant les sommes chiffre à chiffre.
- Le bouton « solution » est à supprimer, son rôle enlève l'intérêt de la situation fondamentale.

3.2 Les expérimentations

L'objet de ces expérimentations est de comprendre ce qui se passe lors de l'exécution des scénarios, d'évaluer l'efficacité de ceux-ci, d'analyser les stratégies observables des élèves et d'estimer si celles-ci sont cohérentes avec les procédures envisagées dans l'analyse a priori.

3.2.1 La course à 20 : analyse a posteriori

Ces expérimentations ont été menées auprès de quatre élèves de 6^e de niveau convenable. Le robot n'ayant pas encore été programmé avec le scénario construit, nous avons effectué des expérimentations en simulant le robot. Il était prévu à l'origine que ce soit un élève de 3^e qui le remplace, mais il s'est avéré que jouer le robot en suivant le logigramme de la séquence était plus difficile qu'il n'y paraît. C'est un enseignant en mathématiques qui a joué ce rôle.

Remarques générales sur le déroulement de la simulation :

- Les élèves doivent être bien concentrés.
- Il y a beaucoup de parties à jouer dans certains cas de figure, c'est un peu lassant pour les élèves.
- Les élèves ont parfois tendance à chercher le dialogue libre, ce qui ne serait pas le cas avec le robot.
- Difficile pour celui qui joue le robot de respecter à la lettre le logigramme prévu. La tentation du dialogue est toujours présente.

L'analyse des transcriptions des vidéos tournées lors des activités avec les élèves permet d'examiner le déroulement des séquences. L'intégralité des transcriptions des séquences vidéo de cette séquence est disponible dans l'annexe 5.

A. Florian

Après les six parties du début, le robot pose une question :

Ligne 3 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier ? Réponds oui ou non.***

« *Regarde les parties que nous avons jouées* » donne une information importante à l'élève en lui suggérant une méthode pour identifier une stratégie possible. Ce premier aménagement du milieu resserre nettement l'incertitude de la situation, sans toutefois aller jusqu'à l'effet Topaze : l'élève doit identifier 17 comme « nombre gagnant » en observant les traces des dernières parties jouées entre lui et le robot, mais comme les propositions de Florian qui suivent en attestent, rien n'est dit sur le fait que ce qu'il y a à trouver correspond à « un nombre gagnant ».

Florian dit savoir comment arriver à 20 le premier :

Ligne 5 → **R: *Donne une idée de comment on peut arriver à 20 le premier.***

Ligne 6 → **E: *Faire un par un.***

Florian fait peut-être allusion ici aux « motifs » du jeu et non à une stratégie gagnante. Dans les parties qu'il a examinées rapidement, il a constaté que nous étions souvent en présence de nombres consécutifs. Quand on lui demande s'il peut préciser, il dit ne pas savoir.

Une autre explication est qu'il ait constaté qu'il y avait une suite gagnante et que celle-ci est arithmétique, avec des nombres régulièrement espacés, sans pouvoir en dire davantage sur la raison.

Après cinq parties de plus, l'élève est questionné par le robot :

Ligne 11 → **R: *Regarde les 11 parties que nous avons jouées. Est-ce que tu peux dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier ?***

Il est demandé à l'élève de regarder les 11 parties jouées, c'est une indication forte, donnée pour la deuxième fois depuis le début de la séquence. L'aménagement du milieu proposé par le robot resserre nettement l'incertitude, d'autant que les dernières parties gagnées correspondent bien à l'application du théorème : 17 est un « nombre gagnant » car le robot « joue bien ».

Ligne 12 → **E: Oui.**

Ligne 13 → **R: Donne une idée de comment on peut arriver à 20 le premier.**

Ligne 14 → **E: On peut arriver à 20 le premier, il faut faire de deux en deux.**

Florian exprime sans doute ici que la suite gagnante est arithmétique de raison 2, à tort puisqu'elle est de raison 3. Quand on lui demande de préciser :

Ligne 16 → **E: Ah, 17.**

Ligne 17 → **R: Si j'ai bien compris, celui qui dit 17, il arrive à 20 le premier.**

L'élève dit 17. A-t-il juste identifié que sur les dernières parties, celui qui dit 17 a gagné, ou généralise-t-il : « celui qui dit 17 gagne » ? A-t-il le théorème attendu en tête lorsqu'il dit 17 ? Rien ne nous permet de l'affirmer. Dès lors, le robot reformule plus que ce que dit vraiment Florian : on assiste à un effet Jourdain, où il semble reconnaître dans la proposition de l'élève la formulation du théorème alors que l'on n'est pas vraiment assuré que celui-ci ait été véritablement construit par l'élève.

Après cinq parties supplémentaires où l'élève commence à chaque fois :

Ligne 22 → **R: Regarde les parties que nous avons jouées. Regarde qui a gagné à chaque fois. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 17 le premier ?**

On resserre l'incertitude à nouveau. Il est demandé à l'élève de regarder les 16 parties jouées, méthode déjà donnée trois fois depuis le début de la séquence.

Ligne 23 → **E: Oui.**

Ligne 24 → **R: Donne une idée de comment on peut arriver à 17 le premier.**

Ligne 25 → **E: Il faut qu'on aille jusqu'à 14.**

Ligne 26 → **R: Si j'ai bien compris, celui qui dit 14 arrive à 17 le premier.**

C'est une confirmation qu'il a identifié la suite gagnante, tout au moins les derniers nombres de cette suite.

Florian a certainement identifié la fin de la suite gagnante, mais le robot reformule à nouveau plus que ce qu'a dit l'élève qui n'explicite pas le lien entre 14 pour arriver à 17. Toutefois comme la formulation de l'élève indique qu'il semble avoir saisi le théorème « il faut qu'on aille jusqu'à 14 », il ne s'agit pas d'un effet Jourdain au même titre que la fois précédente.

Après cinq parties supplémentaires où il commence à chaque fois, il sait que pour arriver à 20 le premier il faut dire 14 puis 17 :

Ligne 30 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire un nombre gagnant plus petit que 17 qui permet d'arriver à 20 en premier ?***

On retrouve l'effet Topaze déjà rencontré, il est demandé à l'élève de regarder les parties jouées, méthode déjà donnée quatre fois depuis le début de la séquence.

Ligne 31 → **E: *14.***

Ligne 32 → **R: *Si j'ai bien compris, celui qui dit 14 arrive à 20 le premier.***

Florian a certainement identifié la fin de la suite gagnante, mais le robot reformule plus que ce qu'a dit l'élève. De nouveau un effet Jourdain.

Après cinq parties supplémentaires où il commence à chaque fois, il est difficile de savoir si Florian sait qu'il faut commencer pour gagner :

Ligne 35 → **R: *Pour gagner est-ce qu'il faut commencer, d'après toi ?***

Ligne 36 → **E: *Ben oui.***

Sa réponse semble être, au moins en partie, conditionnée par la façon dont la question est posée.

Après cinq nouvelles parties où l'élève commence à chaque fois, gagnées à 80 pour cent par l'élève, commence le processus de restitution de la suite gagnante :

Ligne 40 → **R: *J'ai l'impression que tu sais comment gagner à chaque fois que tu commences. Écris la suite des nombres gagnants jusqu'à 20.***

Ligne 41 → **E: *Jusqu'à 20, mais...***

Ligne 42 → **R: *On a vu déjà, on a 14, 17 et 20.***

Ligne 43 → **R: *Pour arriver à 14 le premier, qu'est-ce qu'il faut dire ?***

Ligne 44 → **E: *Ah ben le 11.***

Ligne 45 → **R: *Et pour être sûr de dire 11 le premier, qu'est-ce qu'il faut que tu dises avant ?***

Ligne 36 → **E: *8.***

Ligne 45 → **R: *Et pour être sûr de dire 11 le premier, qu'est-ce qu'il faut que tu dises avant ?***

Ligne 46 → **E: *8.***

Ligne 47 → **R: *Oui.***

Ligne 48 → **E: 5.**

Ligne 49 → **R: Oui.**

Ligne 50 → **E: 2.**

Ligne 51 → **R: Oui.**

Florian est hésitant, le robot lui facilite le travail d'expression de la suite gagnante en le guidant pas à pas.

Il est difficile de savoir comment il a procédé. A-t-il compris pourquoi la suite gagnante était ainsi constituée, de manière à ce que l'adversaire ne puisse pas intervenir si on commence ? Ou bien a-t-il procédé par imitation, en répétant le « motif gagnant » du robot ?

Le robot donne sans doute trop à voir en cherchant à gagner à chaque fois (hormis les deux premières parties où il joue aléatoirement). Mais s'il joue toujours sans chercher à gagner, il ne fournira à l'inverse aucune information à l'élève, qui devra alors se contenter de ses propres coups pour élaborer sa stratégie. Ceci risque alors de nécessiter beaucoup plus de parties pour qu'émerge le théorème-en-acte « 17 » (Annexe 2). Pour améliorer la séquence, on pourrait suggérer de privilégier une stratégie intermédiaire pour le robot, qui jouerait alors comme un élève moyen, ce qui nécessite une modélisation mathématique des diverses façons de jouer de cet élève moyen, tâche assez complexe. On se rapprocherait alors de la phase d'action de la course à 20 de Brousseau (un élève contre un élève).

On peut supposer que la dialectique de l'action fonctionne plutôt correctement, même si nous venons de voir qu'il serait possible de l'améliorer.

La dialectique de formulation prévue par le scénario de la séquence semble fonctionner, le robot cherchant à faire préciser les réponses de l'élève, mais dans le cas de Florian, elle semble supportée par de nombreux effets de contrat qui permettent certes de resserrer l'incertitude de la situation, mais en affaiblissement parfois nettement le rôle antagoniste joué par le milieu aménagé par le robot. Notamment nous avons constaté un effet Jourdain au fil des reformulations automatisées proposées par le robot qui semble en dire « plus » que ce que propose l'élève (par exemple quand celui-ci propose 14). Nous constatons ici que le robot n'influence pas assez le milieu pour que la dialectique de formulation s'installe à coup sûr.

À la fin de la séquence avec Florian, il n'y a pas de dialectique de validation, on ne peut faire état que de la dialectique de l'action.

B. Louise

Après les trois premières parties (sur les six à jouer au début de la séquence), Louise pose une question :

Ligne 5 → ***E: Est-ce qu'à ce jeu l'élève peut gagner ?***

Ligne 6 → ***R: Oui, bien sûr... Mais il faut que tu trouves comment gagner.***

L'enseignant qui simule le robot sort des dialogues prévus pour le robot afin semble-t-il de rassurer l'élève et éclaircir le contrat didactique.

Après les six parties du début, le robot pose une question :

Ligne 11 → ***R: Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier ? Réponds oui ou non.***

« ***Regarde les parties que nous avons jouées*** » donne une information importante à l'élève en lui suggérant une méthode pour identifier une stratégie possible. L'aménagement du milieu permet de resserrer l'incertitude sans pour autant aller jusqu'à l'effet Topaze.

Louise hésite sur la réponse à donner :

Ligne 12 → ***E: Ben euh... À partir de 10 jusqu'à 20, vous dites toujours les mêmes nombres... Peut-être il faut que l'adversaire fasse 17 ?***

Le robot attendant « oui » ou « non », la question est reposée à l'élève :

Ligne 15 → ***R: Est-ce que tu peux dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier. Oui ou non ?***

Ligne 16 → ***E: Non.***

Après cinq parties de plus où Nao et l'élève commence alternativement, le robot questionne de nouveau l'élève :

Ligne 23 → ***R: Regarde les 11 parties que nous avons jouées. Est-ce que tu peux dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier ?***

De nouveau un effet Topaze, il est demandé à l'élève de regarder les 11 parties jouées, c'est une indication forte, donnée pour la deuxième fois depuis le début de la séquence.

Ligne 24 → ***E: Oui... Vous avez toujours 17.***

Ligne 25 → ***R: Si j'ai bien compris, celui qui dit 17, il arrive à 20 le premier.***

Louise a certainement identifié la fin de la suite gagnante, mais le robot reformule plus que ce qu'a dit l'élève. Effet de contrat : effet Jourdain.

Après cinq parties supplémentaires où l'élève commence à chaque fois :

Ligne 31 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 17 en premier ?***

On retrouve l'effet Topaze déjà rencontré, il est demandé à l'élève de regarder les 16 parties jouées, méthode déjà donnée trois fois depuis le début de la séquence.

Ligne 32 → **E: *Oui, il faut dire 14.***

Ligne 33 → **R: *Si j'ai bien compris, celui qui dit 14, il arrive à 17 le premier.***

Louise a certainement élargi sa connaissance de la suite gagnante, mais le robot reformule plus que ce qu'elle a dit. Effet de contrat : effet Jourdain.

Ligne 35 → **R: *Bon alors, on va jouer de nouveau à celui qui dira 20 en premier. On va jouer 5 parties et c'est toi qui vas commencer à chaque fois.***

Après une partie (perdue), Louise dit :

Ligne 38 → **E: *J'avais une bonne idée.***

Ligne 39 → **R: *Mais tu as 5 parties, tu as le temps de la mettre en place.***

Louise semble avoir trouvé quelque chose, sans pouvoir bien l'utiliser.

Après une autre partie encore perdue :

Ligne 42 → **E: *En plus, je sais comment faut faire pour arriver jusqu'à 20. J'ai trouvé, mais j'arrive pas à l'appliquer.***

Louise semble avoir identifié la suite gagnante, mais n'arrive pas à la mettre en œuvre pour gagner. A-t-elle vraiment compris comment est formée cette suite ou bien est-elle seulement capable de l'imiter, ce qui expliquerait sa difficulté à l'utiliser ?

Le « J'ai trouvé, mais j'arrive pas à l'appliquer » semble indiquer que la dialectique de l'action est en place. De même qu'une amorce de dialectique de formulation semble être présente sans qu'on puisse en mesurer vraiment l'intensité. En revanche, la dialectique de la validation est absente, et cette absence est un frein à la progression de Louise dans sa recherche de la stratégie optimale.

Au bout des cinq parties :

Ligne 50 → **E: *J'ai trouvé une solution.***

Ligne 51 → **R: Attends, attends, le robot te pose des questions.**

Ligne 52 → **R: Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu me dire un nombre gagnant plus petit que 17 qui permet d'arriver à 20 ?**

On peut y voir un effet Topaze.

Ligne 55 → **E: 14.**

Ligne 56 → **R: Donne-moi ce nombre qui permet d'arriver à 20 en premier.**

Ligne 57 → **R: ça veut dire que celui qui dit 14 il est sûr d'arriver à 20 en premier ?**

On peut y voir un effet Jourdain.

Ligne 58 → **E: Oui.**

Ligne 62 → **R: Alors faisons 5 parties pour voir.**

Ligne 63 → **E: Mais je ne sais pas les faire.**

On retrouve la difficulté de Louise à exploiter ce qu'elle pense avoir compris.

Pour faire les cinq dernières parties de la séquence, Louise ne souhaite pas commencer. Après une seule de ces parties jouées lors de laquelle elle a perdu, la question lui est reposée et cette fois elle souhaite commencer. Elle perd encore et décide alors de ne pas commencer la suivante.

Au bout des cinq parties :

Ligne 83 → **R: Maintenant... On continue... Tu as peut-être de nouvelles idées pour arriver à 20.**

Ligne 84 → **E: Oui, j'ai de nouvelles idées.**

Ligne 85 → **R: Tu penses qu'il faut que tu commences ?**

Ligne 86 → **E: Non, je sais pas. Quand vous avez commencé, vous gagnez, quand j'ai commencé vous gagnez aussi.**

Ceci semble confirmer que Louise est dans l'observation et non dans un raisonnement arithmétique. Elle ne prend pas en compte le fait que le robot a gagné parce qu'elle avait mal joué, ce qui est indépendant de qui commence.

Ligne 87 → **R: Regarde bien toutes les parties jouées.**

Après une minute de réflexion, l'élève déclare qu'il faut commencer. Difficile de dire ce qui a éclairé sa réflexion.

Puis elle énoncé la suite gagnante : 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20.

Dans le cas de cet élève, on peut penser qu'elle a procédé surtout par imitation en cherchant à placer la suite gagnante utilisée par le robot.

La dialectique de l'action semble fonctionner assez moyennement ici. Louise observe-t-elle la stratégie du robot plus qu'elle ne réfléchit à ce qu'elle fait ? Ce qui fait difficulté pour cette élève est lié à la complexité de la dialectique de la validation du jeu de la course à 20 : on gagne parfois alors même qu'on n'a pas mis en œuvre un théorème « gagnant » (du type « il faut commencer pour gagner »)... Donc dans le cas de Louise, il semble qu'elle est bien à la recherche d'une dialectique de la validation, mais ayant des difficultés pour y accéder, cela freine la dialectique de l'action qu'elle cherche à mettre en lien.

C. Margot

Après les six parties du début, le robot pose une question :

Ligne 12 → **R: Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier ?**

On peut y voir un effet Topaze.

Ligne 13 → **E: Monsieur, j'arrive pas à voir, mais tout à l'heure y a un endroit... là, je crois...**

Ligne 14 → **R: Attention tu parles au robot, hein.**

Ligne 15 → **R: Alors, dis-moi, est-ce que tu peux dire quelque chose... ou pas ?**

Ligne 16 → **E: Oui.**

Ligne 17 → **R: Donne une idée de comment on peut arriver à 20 le premier.**

Ligne 18 → **E: Être plus malin que l'autre, déjà.**

Ligne 19 → **R: Oui, ça d'accord. Le robot dit : « Je n'ai pas compris, peux-tu préciser un peu ».**

Ligne 20 → **E: Déjà, dès qu'on arrive dans les environs de 17, faut faire attention à ce que ce soit nous qui donnions le chiffre 17... Comme ça l'autre, il peut mettre soit 18 donc nous on arrive à 20 direct soit 19 donc nous on arrive à 20 direct.**

On devine ici l'amorce d'une dialectique de validation.

Ligne 21 → **R: D'accord, donc si j'ai bien compris, moi je fais le robot, hein, si j'ai bien compris celui qui dit 17 il arrive à 20 le premier. Es-tu sûre ?**

On peut y voir un effet Jourdain.

Ligne 22 → **E: Oui.**

Margot a compris pourquoi dire 17 permet de gagner et elle le formule. Le robot a détecté qu'elle avait dit 17 et formule sa phrase habituelle. Dans l'état actuel du scénario et des capacités de reconnaissance vocale, le robot ne peut pas interpréter ce qu'a dit l'élève. A l'inverse de ce que l'on a pu voir dans un épisode avec Florian, ici le robot dit « moins » que ce que Margot propose. Les dialectiques de validation et même de preuve visiblement engagées par l'élève ne sont pas reprises dans la reformulation par le robot de sa proposition qui repose exclusivement sur la dialectique de la formulation.

Après cinq parties supplémentaires où l'élève commence à chaque fois :

Ligne 25 → **R: Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 17 en premier ?**

On peut y voir un effet Topaze.

Ligne 32 → **E: Oui, je pense.**

Ligne 33 → **R: Donne une idée de comment on peut arriver à 17 le premier.**

Ligne 34 → **E: Faire attention de ne pas prononcer les chiffres 15 ou 16. Il faut dire soit 14... faut dire le nombre 14, pas le nombre 13.**

Ligne 35 → **R: Si j'ai bien compris, celui qui dit 14 arrive à 17 le premier.**

On peut y voir un effet Jourdain.

Ligne 36 → **E: Oui.**

Margot semble avoir compris la stratégie gagnante.

Le robot lance cinq nouvelles parties où l'élève commence à chaque fois. Près de la fin de la première partie :

Ligne 46 → **E : [le robot dit 14] Et j'ai perdu...**

Ligne 47 → **R : Tu dis c'est pas la peine d'aller plus loin.**

Ligne 48 → **E : Oui, c'est pas la peine d'aller plus loin. Si je dis 15, vous allez dire 17, si je dis 16 vous allez dire 17, donc ensuite quand on va continuer vous arriverez forcément jusqu'à 20.**

Nous avons là une dialectique de formulation et une dialectique de validation. Margot est la seule des quatre élèves à proposer spontanément une phase de validation, mais celle-ci est partielle puisqu'il n'y a pas de rétroaction de la part du robot.

Ligne 50 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu me dire un nombre gagnant plus petit que 17 qui permet d'arriver à 20 ?***

On peut y voir un effet Topaze.

Ligne 51 → **E: *Oui.***

Ligne 52 → **R: *Donne-moi ce nombre qui permet d'arriver à 20 en premier.***

Ligne 53 → **E: *14.***

Ligne 54 → **R: *Si j'ai bien compris, celui qui dit 14 arrive à 20 en premier ?***

L'étude de ce bref échange pourrait laisser penser que l'on assiste à un effet Jourdain du même type que celui constaté lors des échanges avec Florian. Sauf que dans le cas de Margot, au vu des interactions précédentes, on peut penser que la réponse laconique « 14 » est bien un indice de connaissance assez « savante » : on peut faire l'hypothèse que lorsqu'elle propose 14, cette élève ayant engagé une dialectique de la validation, voire de la preuve à l'étape précédente a bien le théorème en tête. D'ailleurs le commentaire qui suit semble attester que la formulation du robot coïncide avec sa proposition.

Ligne 55 → **E: *C'est ça.***

Margot confirme qu'elle a compris comment fonctionnait la suite gagnante.

Ligne 58 → **R: *Tu as peut-être de nouvelles idées pour arriver à 20 en premier à chaque partie. On fait 5 parties de plus. Veux-tu commencer ? Oui, tout le temps, non ou c'est sans importance ?***

Ligne 59 → **E: *oui, tout le temps.***

Ligne 54 → **R: *Alors faisons ces 5 parties. C'est toi qui commences donc à chaque fois.***

L'élève a compris qu'il fallait commencer pour être sûr de gagner.

Au bout de cinq parties supplémentaires où c'est elle qui commence, Margot énonce la suite gagnante : 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20.

Le robot n'influence pas assez le milieu pour que la dialectique de formulation s'installe à coup sûr. Cependant ici, l'élève parvient à formuler et même à valider sa stratégie grâce sans doute à ses compétences personnelles. Le rapport qu'elle entretient avec son adversaire entre peut-être également en ligne de compte. Margot est celle qui verbalise le plus, qui semble oublier que son interlocuteur simule le robot et n'est donc pas disponible pour des activités langagières. Elle ose exprimer ses idées à haute voix, peu lui importe qu'il n'y ait pas toujours de rétroaction. D'autant

que dans ces échanges avec l'enseignant (pourtant prisonnier de son rôle de robot), une absence de rétroaction veut dire quelque chose. Si elle disait une énormité, l'enseignant ne réagirait-il pas ? On peut se demander quelle serait son attitude en face du véritable robot.

C'est la seule élève des tests à s'être spontanément engagée dans une dialectique de validation, voire de preuve. Margot a étudié soigneusement les parties jouées (et celle en cours de jeu) et a ainsi interagi directement avec le milieu pour construire un raisonnement autour des théorèmes proposés (notamment « qui arrive à 17 le premier gagne »).

Malheureusement, au fil des interactions automatisées proposées, le robot n'est pas en mesure de reprendre les propositions de Margot dans le sens de ces dialectiques de validation, voire de preuve. Dès lors, lorsqu'il reformule et énonce le théorème, il en dit moins que ce que dit l'élève : on assiste à un effet inverse de l'effet Jourdain où le robot ne se saisit pas des indices de connaissances savantes de l'élève.

D. Baptiste

Après les six parties du début, le robot pose une question :

Ligne 14 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 20 le premier ?***

On peut y voir un effet Topaze.

Ligne 15 → **E: *Celui qui arrive le premier à 17 a gagné.***

Ligne 20 → **R: *Donc si j'ai bien compris, celui qui dit 17 il arrive à 20 le premier. Es-tu sûr ?***

On peut y voir un effet Jourdain.

Ligne 21 → **E: *Oui.***

Baptiste a compris que dire 17 permet de gagner. On ne sait pas si c'est par imitation de ce que fait le robot ou par réflexion

Après cinq parties supplémentaires où l'élève commence à chaque fois :

Ligne 26 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu dire quelque chose qui permet d'arriver à 17 en premier ?***

Ligne 27 → **E: *Celui qui trouve 14 il est forcément obligé de trouver 17.***

Le « forcément » utilisé suggère que l'élève a compris la procédure pour gagner et ne se contente pas d'imiter ce que fait le robot.

Ligne 30 → **R: *Si j'ai bien compris, celui qui dit 14 arrive à 17 le premier.***

La reformulation proposée par le robot coïncide donc parfaitement avec la proposition de Baptiste.

Ligne 31 → **E: *Oui.***

Baptiste semble avoir compris la stratégie gagnante.

Le robot lance cinq nouvelles parties où l'élève commence à chaque fois.

Ligne 41 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu me dire un nombre gagnant plus petit que 17 qui permet d'arriver à 20 ?***

On peut y voir un effet Topaze.

Ligne 42 → **E: *11.***

Face à cette réponse, le robot est démuni, cette valeur n'a pas été prévue dans le scénario, il repose alors la question.

Ligne 43 → **R: *Regarde les parties que nous avons jouées. Peux-tu me dire un nombre gagnant plus petit que 17 qui permet d'arriver à 20 ?***

Ligne 44 → **E: *C'est-à-dire ?***

L'élève ne comprend pas ce qu'on attend de lui. Le rejet de la valeur 11 qu'il a proposée et qui est bonne le perturbe.

Ligne 45 → **R: *un nombre gagnant plus petit que 17 qui permet d'arriver à 20 ?***

Ligne 46 → **E: *14. [L'élève a réfléchi pour savoir quelle était l'attente, pas convaincu de la pertinence de la réponse attendue. A quand même trouvé ce qu'on attendait.]***

Ligne 47 → **R: *Si j'ai bien compris, celui qui dit 14 arrive à 20 en premier ?***

On peut y voir un effet Jourdain.

Ligne 48 → **E: *Oui.***

On peut faire l'hypothèse que Baptiste a compris comment fonctionne la suite gagnante puisqu'il évoque 11 puis 14. Malheureusement, la non-détection par le robot de la pertinence de la proposition du nombre 11 est déroutante pour l'élève. Elle aurait pu être plus fâcheuse encore en remettant en cause la réflexion de l'élève, qui aurait pu y voir une invalidation de sa stratégie. La

réflexion de l'élève lui permet de détecter l'attente du robot, Baptiste étant soucieux de jouer son rôle prévu par le contrat didactique.

Ligne 51 → **R:** *Tu as peut-être de nouvelles idées pour arriver à 20 en premier à chaque partie.*

Ligne 52 → **E:** *Euh... Oui.*

Ligne 53 → **R:** *Est-ce que d'après toi il faut que tu commences, ça n'a pas d'importance ou est-ce qu'il faut que ce soit l'adversaire qui commence ?*

Ligne 56 → **E:** *Je commence.*

Ligne 57 → **R:** *On en fait 5 de plus.*

Ligne 58 → **E:** *Je veux bien en faire une où je ne commence pas.*

C'est une entorse à la stratégie prévue pour le robot, mais l'adulte qui le simule accepte la demande de l'élève. Ce dernier semble avoir compris qu'il fallait commencer, mais sans en être complètement sûr. Le scénario implémenté dans le robot ne propose pas un cheminement prenant en compte cette demande, pourtant légitime, de l'élève.

Au bout de cinq parties supplémentaires où c'est lui qui commence, l'élève déclare qu'il a trouvé puis il énonce la suite gagnante : 2, 5, 8, 11, 14, 17, 20.

Conclusions sur la séquence « Course à 20 »

- **Les effets de contrat :** quelques effets de contrat sont visibles, mais il est difficile de ne pas en avoir. Par ailleurs, ces effets sont en partie liés aux difficultés de mettre en place les dialectiques de formulation et de validation.
- **Les dialectiques.**
 - La dialectique de l'action fonctionne efficacement.
 - La dialectique de formulation prévue par le scénario de la séquence semble fonctionner, mais on peut se demander s'il ne s'agit pas des effets de contrat que nous avons repérés. Le robot n'influence pas assez le milieu pour que la dialectique de formulation s'installe à coup sûr.
 - La dialectique de validation n'apparaît pas si l'élève n'en est pas à l'origine. On reste dans la dialectique de l'action et, dans une moindre mesure, dans la dialectique de la formulation. Même quand il y a une dialectique de validation initiée par l'élève, le robot ne propose pas les rétroactions nécessaires pour que celle-ci aboutisse à coup sûr.

Selon les élèves, les propositions de reformulation du robot sont plus ou moins pertinentes. Par exemple, pour Florian, les propositions du robot vont au-delà des connaissances de l'élève, d'où l'effet Jourdain. Pour Margot, le robot ne permet pas de récupérer toutes les connaissances mises en fonctionnement par l'élève, un effet Jourdain à l'envers. Pour Baptiste, alors que les propositions de reformulation du robot sont adaptées pour 17 et 14, elles sont insuffisantes pour 11.

- **L'ambiguïté de la course à 20.** On peut se demander si la course à 20 n'est pas plus ambiguë qu'elle n'y paraît, notamment en ce qui concerne la stratégie utilisée par l'élève pour gagner. Mène-t-il un raisonnement arithmétique ou bien observe-t-il comment procède l'adversaire qui gagne afin de l'imiter ? Construit-on toujours le savoir visé ?

Après l'analyse a posteriori de cette situation au cœur didactique bien établi, nous pouvons analyser l'autre situation, qui semble posséder un potentiel didactique moindre. Ainsi, nous pourrions étudier les différences entre les deux situations et, en particulier, analyser si l'influence du robot est la même dans l'aménagement du milieu.

3.2.2 La monnaie des humains

L'intégralité des transcriptions des séquences vidéo de cette séquence est disponible dans l'annexe 6.

A. Chloé

		Somme	Proposition 1	Proposition 2
CHLOÉ	1	4,30 €	$2 \times 2 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 4,30 \text{ €}$	
	2	37,30 €	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 30,30 \text{ €}$	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 2 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 37,30 \text{ €}$
	3	11,20 €	$1 \times 10 + 1 \times 1 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 12,30 \text{ €}$	$1 \times 10 + 1 \times 1 + 1 \times 0,20 = 11,20 \text{ €}$
	4	16 €	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 1 = 16 \text{ €}$	

On retrouve le choix perfectible des valeurs des sommes à composer évoqué dans l'analyse a priori. Après avoir proposé l'objet 1 à 37,30 €, le scénario demande de composer la somme 11,20 € qui est beaucoup plus simple à réaliser puisque ceci peut se faire par lecture directe des objets 10 €, 1 € et 0,20 €. L'élève a échoué pour l'objet 2, mais a bien corrigé son erreur, sur laquelle nous n'avons pas d'éléments pour en retracer l'origine.

La somme 4 est trop facile à composer. La détection de deux erreurs en 2 et en 3 a sans doute entraîné ce choix, mais l'élève s'étant corrigé seul à deux reprises, il aurait été intéressant de lui proposer quelque chose de plus difficile.

B. Jeanne 1

		Somme	Proposition 1	Proposition 2
JEANNE 1	1	17 €	$1 \times 10 + 1 \times 0,10 + 1 \times 0,05 + 1 \times 0,02 = 10,17 \text{ €}$	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 2 = 17 \text{ €}$
	2	13 €	$1 \times 10 + 1 \times 2 + 1 \times 1 = 13 \text{ €}$	
	3	31 €	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 1 = 31 \text{ €}$	
	4	43 €	$2 \times 20 + 1 \times 2 + 1 \times 1 = 43 \text{ €}$	

Avec les réussites de Jeanne, on pourrait s'attendre à ce qu'on progresse dans la difficulté, que les sommes soient plus complexes à composer, mais ce n'est pas le cas. De plus, le choix de sommes uniquement entières est curieux. Peut-être y a-t-il eu un problème de programmation qui a perturbé la génération des sommes prévue ou le changement de niveau prévus dans le scénario initial.

L'erreur commise par Jeanne pour l'objet 1 est difficilement interprétable, erreur qu'elle a ensuite corrigée.

C. Jeanne 2

		Somme	Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3
JEANNE 2	1	25,40 €	$1 \times 20 + 1 \times 5 + 2 \times 0,20 = 25,40 \text{ €}$		
	2	14,60 €	$1 \times 10 + 2 \times 2 + 1 \times 0,05 + 1 \times 0,01 = 14,06 \text{ €}$	$7 \times 10 + 2 \times 2 + 1 \times 0,05 + 1 \times 0,01 = 74,06 \text{ €}$	$1 \times 10 + 2 \times 2 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,10 = 14,60 \text{ €}$
	3	21,90 €	$1 \times 20 + 1 \times 1 + 1 \times 0,50 + 2 \times 0,20 = 21,90 \text{ €}$		
	4	36,60 €	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 3 \times 2 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,10 = 36,60 \text{ €}$	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 1 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,10 = 36,60 \text{ €}$	

L'erreur commise par Jeanne pour l'objet 2 en proposition 1 vient certainement de l'interface visuelle utilisée pour cette séquence. Elle affiche la somme à composer, ici 14,60 € en enlevant les zéros inutiles, ce qui donne ici « 14,6 € », et représente alors une source de difficulté pour des élèves de CE2. Jeanne corrigeant elle-même son erreur par la suite, nous pouvons penser que c'est l'énoncé oral de la somme qui lui permet finalement de comprendre pourquoi sa composition est rejetée et d'y remédier.

Pour l'objet 4, Jeanne s'y est reprise à deux fois pour obtenir une composition optimisée (minimalisation du nombre total de billets et de pièces) de la somme demandée.

D. Juliette 1

		Somme	Proposition 1	Proposition 2
JULIETTE1	1	14,80 €	$1 \times 10 + 2 \times 2 + 4 \times 0,20 = 14,80 \text{ €}$	$1 \times 20 + 2 \times 2 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 14,80 \text{ €}$
	2	4,10 €	$1 \times 2 = 2 \text{ €}$	$2 \times 2 + 1 \times 0,10 = 4,10 \text{ €}$
	3	30,60 €	$1 \times 20 + 1 \times 10 = 30 \text{ €}$	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,10 = 30,60 \text{ €}$
	4	14 €	$1 \times 10 + 2 \times 2 = 14 \text{ €}$	

Les erreurs pour les objets 2 et 3 sont curieuses. Peut-être y a-t-il eu un problème de manipulation des objets présents dans l'interface.

La progression dans la difficulté n'est pas correcte. Composer 14 € est plus simple que les sommes précédentes proposées.

E. Juliette 2

		Somme	Proposition 1	Proposition 2
JULIETTE2	1	15,80 €	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 15,80 \text{ €}$	
	2	11,30 €	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 15,30 \text{ €}$	$1 \times 10 + 1 \times 1 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 11,30 \text{ €}$
	3	16,70 €	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 1 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 16,80 \text{ €}$	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 1 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,20 = 16,70 \text{ €}$
	4	11,80 €	$1 \times 10 + 1 \times 1 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 11,80 \text{ €}$	

La progression dans la difficulté est perfectible. Par exemple, composer 11,30 € est plus facile que composer 15,80 €. La stratégie optimale, décomposer en minimisant le nombre de termes, amène Juliette à une somme de quatre termes pour 11,30 € et à une somme de 5 termes pour 15,80 €, les termes eux-mêmes étant par ailleurs de complexité similaire pour les deux sommes.

La vidéo de l'expérimentation montre que, pour corriger l'erreur pour l'objet 2, Juliette a modifié la somme qu'elle avait composée en enlevant le billet de 5 euros pour le remplacer par une pièce de 1 euro. Nous avons ici un exemple de l'absence de vidage de la zone en cas d'erreur, ce qui complique la tâche de l'élève qui est amené à soustraire puis à additionner.

F. Lia 1

		Somme	Proposition 1	Proposition 2
LIA 1	1	16 €	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 1 = 16 \text{ €}$	
	2	19 €	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 2 + 1 \times 1 = 18 \text{ €}$	$1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 2 + 2 \times 1 = 19 \text{ €}$
	3		BUG TECHNIQUE, ARRÊT DE LA SÉQUENCE	

Les sommes sont trop simples à composer.

G. Lia 2

		Somme	Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3	Proposition 4
LIA 2	1	20 €	$1 \times 20 = 20 \text{ €}$			
	2	3 €	$1 \times 2 + 1 \times 1 = 3 \text{ €}$			
	3	20,10 €	$1 \times 20 + 1 \times 0,01 = 20,01 \text{ €}$	$1 \times 20 + 1 \times 0,10 = 20,10 \text{ €}$		
	4	49,50 €	$2 \times 20 + 1 \times 5 = 45 \text{ €}$	$2 \times 20 + 1 \times 5 + 2 \times 2 + 1 \times 1 + 1 \times 0,05 = 50,05 \text{ €}$	$2 \times 20 + 1 \times 5 + 2 \times 2 + 1 \times 0,05 = 49,05 \text{ €}$	$2 \times 20 + 1 \times 5 + 2 \times 2 + 1 \times 0,50 = 49,50 \text{ €}$

Les erreurs commises par Lia pour l'objet 3 en proposition 1 et pour l'objet 4 en proposition 3 viennent vraisemblablement de l'interface visuelle utilisée pour cette séquence. Elle affiche la somme à composer, ici 20,10 € et 49,50 € en enlevant les zéros inutiles, ce qui donne respectivement « 20,1 € » et « 49,5 », et représente alors une source de difficulté importante pour des élèves de CE2. Lia se corrigeant elle-même à deux reprises, nous pouvons penser qu'une fois la confusion passée, l'énoncé oral des sommes lui permet de corriger ses erreurs.

H. Lia 3

		Somme	Proposition 1	Proposition 2
LIA 3	1	33,60 €	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,10 = 30,60 \text{ €}$	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 2 + 1 \times 1 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,10 = 33,60 \text{ €}$
	2	11,10 €	$1 \times 10 + 1 \times 1 + 1 \times 0,10 = 11,10 \text{ €}$	
	3	32,80 €	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 2 + 1 \times 0,50 + 1 \times 0,20 + 1 \times 0,10 = 32,80 \text{ €}$	
	4		BUG TECHNIQUE, ARRÊT DE LA SÉQUENCE	

Après l'erreur commise pour l'objet 1, la somme de l'objet 2 n'est pas plus difficile à composer alors même que Lia a très bien corrigé son erreur. On pourrait affiner la stratégie du scénario en analysant plus finement les erreurs afin de tenter d'en détecter la nature et ainsi orienter plus judicieusement le cheminement de l'élève

I. Pia

		Somme	Proposition 1	Proposition 2	Proposition 3	Proposition 4
PIA	1	29 €	$1 \times 20 + 1 \times 5 + 1 \times 2 + 3 \times 1 = 30 \text{ €}$	$1 \times 20 + 1 \times 5 + 1 \times 2 + 2 \times 1 = 29 \text{ €}$	$1 \times 20 + 1 \times 5 + 2 \times 2 = 29 \text{ €}$	
	2	4 €	$2 \times 2 = 4 \text{ €}$			
	3	16 €	$1 \times 10 = 10 \text{ €}$	$1 \times 10 + 3 \times 2 = 16 \text{ €}$	$1 \times 10 + 6 \times 1 = 16 \text{ €}$	$1 \times 10 + 2 \times 2 + 2 \times 1 = 16 \text{ €}$ Le robot a ensuite corrigé : $1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 1$
	4	37 €	$1 \times 20 + 1 \times 10 + 1 \times 5 + 1 \times 2 = 37 \text{ €}$			

De nouveau, le choix de sommes uniquement entières est curieux. Peut-être y a-t-il eu un problème de programmation qui a perturbé la génération des sommes prévue ou le changement de niveau prévus dans le scénario initial.

Pour l'objet 3 en proposition 3, Pia semble comprendre que plus simple signifie ici des pièces de plus petite valeur ou bien le moins de pièces différentes possible et non le moins d'objets possible.

Cette recherche d'optimisation erronée est l'occasion de revenir sur le peu de pertinence de la composante temps du bilan qu'il est prévu que le robot remette à l'adulte prescripteur en fin de séquence. En effet, déposer 1 billet de 10 € et 6 pièces de 1 € est plus rapide que réfléchir à l'optimisation du nombre de termes de la somme puis composer celle-ci. Les élèves sachant que le temps est enregistré, la prise en compte de celui-ci peut s'opposer à la recherche d'optimisation.

Pour l'objet 4, Pia a apparemment compris la stratégie optimale et minimise correctement le nombre de termes. Les sommes qu'elle a été amenée à optimiser avant l'ont très certainement aidée à surmonter cette difficulté.

Conclusions sur la séquence « Monnaie des Humains »

- La progressivité de la difficulté n'est pas toujours assurée au sein d'une même séquence. Un élève peut être amené à composer des sommes plus simples que celles qu'il a déjà composées. Une explication à ce phénomène est la prise en compte des erreurs des élèves comme indicateur de leurs capacités à réaliser la tâche demandée. Même si un élève réussit à corriger rapidement et facilement une erreur qu'il a commise, le scénario prévu hésite à lui proposer quelque chose de plus difficile.
- La prise en compte du temps n'est pas cohérente avec la recherche d'optimisation. Il est parfois plus rapide de composer une somme avec plus d'objets que nécessaire, la phase d'optimisation demandant davantage de réflexion.
- L'affiche de la somme à composer réalisée en supprimant les zéros inutiles ajoute une difficulté conséquente pour des élèves de CE2.
- L'impact de l'affichage sur l'interface visuelle de la somme en cours de composition par l'élève est difficile à estimer à travers cette expérimentation. On peut cependant penser que cet affichage joue un rôle en permettant à l'élève de procéder par comparaison de la somme en cours de réalisation avec la somme à construire également affichée, comparaison illusoire puisque l'affichage des nombres n'y est pas le même (l'affichage de la somme de l'élève met les zéros inutiles). Un entretien d'autoconfrontation avec l'élève à l'issue de la séquence pourrait apporter des réponses à cette interrogation.

- Quand il y a une erreur, la zone de composition des sommes n'est pas vidée, ce qui induit une difficulté pour les élèves, qui doivent soustraire et additionner dans le même temps.

On peut également noter que le robot pourrait ne pas parler sans que cela soit véritablement préjudiciable à la séquence, hormis lorsque l'élève a besoin de se corriger à cause des problèmes d'affichage des nombres présents dans l'interface visuelle. Mais le comportement de l'élève en difficulté, en particulier sa motivation, serait-il le même ?

3.2.3 Le bilan des expérimentations

Nous souhaitons évaluer l'apport de l'analyse a priori sur l'analyse et l'élaboration de séquences d'apprentissage avec le robot. Par ailleurs, une question se posait sur la capacité du robot à aménager le milieu. En outre, nous cherchions à appréhender les interactions robot/élève en matière de dialectiques d'action, de formulation et de validation. Les expérimentations menées et les analyses a posteriori qui en ont découlé apportent quelques réponses, à deux niveaux :

A. Lien entre le robot, les variables didactiques et le milieu

Grâce à l'analyse a priori, nous pouvons étudier et anticiper l'influence du robot sur la situation. À travers le paramétrage des variables didactiques, nous pouvons aménager le milieu de manière qu'il soit le plus utile possible à la construction par l'élève du savoir mathématique visé.

Le cœur de la séquence « la course à 20 avec Nao » est une situation adidactique sur la construction de laquelle nous pouvons intervenir en paramétrant les sept variables didactiques mises en évidence par l'analyse a priori de cette séquence.

La séquence « la monnaie des humains » ne contient pas de situation adidactique construite. Cependant, le double affichage « somme à composer »/« somme en cours de composition » fournit involontairement une rétroaction à l'élève qui compare les deux affichages pour juger de la véracité de sa composition. Cette séquence permet de retravailler certaines notions mathématiques, mais n'est pas adaptée à la construction par l'élève lui-même d'un savoir mathématique donné, ce qui nécessite une composante adidactique forte, inexistante ici.

Dans les deux séquences, le robot paraît apporter de la motivation et de la concentration supplémentaires, et aider l'élève à progresser. Son influence est particulièrement intéressante dans la « course à 20 » grâce aux nombreuses variables didactiques sur lesquelles l'auteur de la séquence peut agir pour calibrer le milieu.

B. Lien entre le robot et les dialectiques d'action, de formulation et de validation

La dialectique de l'action est à l'œuvre dans les deux séquences, avec une efficacité intéressante si l'on en juge les résultats positifs obtenus par les élèves.

Les dialectiques de formulation et de validation ne sont pas assez présentes dans les séquences. Ceci est fréquent dans les EIAH, où les activités langagières sont généralement réduites. Les évolutions des systèmes informatisées amélioreront certainement cet aspect. Nous pouvons cependant déjà tenter de dynamiser ces dialectiques en modifiant ce que le robot peut détecter dans les activités langagières de l'élève, et en adaptant le scénario afin de favoriser l'émergence de ces dialectiques. Pour cela, nous pouvons agir sur la finesse de détection de la reconnaissance vocale (mots-clés, expressions-clés, phrases-clés) ainsi que sur l'arborescence des dialogues, en proposant davantage d'étapes afin que l'élève puisse s'engager plus clairement dans la dialectique visée.

Conclusion

Les outils utilisés, en particulier l'analyse a priori, ont permis d'étudier et d'anticiper l'influence du robot sur la situation. Dans les deux séquences, le robot semble apporter de la motivation et de la concentration et permettre à l'élève de réellement progresser. Son influence est particulièrement intéressante dans la « course à 20 » dont le cœur est une situation adidactique, grâce aux nombreuses variables didactiques qui permettent de modéliser la situation. Avec ces variables didactiques, nous pouvons utiliser le robot pour aménager le milieu de manière qu'il soit le plus utile possible à la construction par l'élève du savoir mathématique visé. Lors de ces expérimentations, nous avons atteint des limites de la « course à 20 » avec le robot, principalement du fait des interactions langagières automatisées, qui ne coïncident qu'approximativement avec les jeux de connaissances mis en fonctionnement par les élèves. Si la dialectique de l'action est bien présente, il n'en va pas de même avec les dialectiques de formulation et de validation, peu présentes voire absentes du processus didactique, ce qui l'affaiblit. Mais la robustesse de la modélisation proposée dans le cadre de la théorie des situations didactiques est bien illustrée par cette transposition de la course à 20 avec le robot : en fin de compte tous les élèves aboutissent à la découverte d'une stratégie gagnante en engageant au moins une partie des connaissances visées.

Dès lors, on peut penser que les outils de la théorie des situations didactiques nous fournissent les moyens théoriques et pratiques d'élaborer, d'analyser des situations didactiques avec le robot, qui soient propices à des apprentissages.

Notre brève analyse de la situation de la monnaie illustre, par exemple, comment on peut apporter des améliorations des variables didactiques à partir d'une séquence préexistante, qui, en l'absence de ces améliorations, pose difficulté et ne semble pas provoquer les apprentissages visés chez les élèves avec lesquels nous avons pu l'expérimenter.

Pour approfondir le travail présenté ici, qui ne repose que sur deux séquences, nous pourrions construire d'autres séquences à implémenter dans le robot, et les expérimenter avec des élèves significativement plus nombreux.

À l'heure du cloud computing², nous pourrions imaginer d'aller plus loin encore en accédant aux très nombreuses données qui seraient mutualisées par les robots expérimentant des séquences avec des élèves. Voire d'optimiser des chemins de remédiation en comparant les performances des

² Le cloud computing¹ est un concept qui consiste à déporter sur des serveurs distants des stockages et des traitements informatiques traditionnellement localisés sur des serveurs locaux ou sur le poste de l'utilisateur². Plus précisément selon le National Institute of Standards and Technology (NIST), le cloud computing est l'accès via le réseau, à la demande et en libre-service à des ressources informatiques virtualisées et mutualisées.

séquences didactiques suivies par les élèves. Cette double approche est séduisante : la recherche en didactique pour l'outillage aux fins d'analyse et d'élaboration des séquences, et la mutualisation des séquences et des résultats des élèves pour détecter des cheminements optimaux.

Par ailleurs, l'éclairage que peuvent apporter les sciences cognitives pourrait être intéressant à prendre en compte pour élargir la palette d'outils disponibles. Les premiers travaux en psychologie cognitive menés dans le cadre du projet RASPO, par le laboratoire LUTIN de la Cité des Sciences et de l'Industrie de Paris, indiquent en effet que le robot influe positivement sur la concentration et la motivation des élèves. Nous sommes tentés d'ajouter que le robot ne se lasse jamais et est en permanence d'humeur égale, mais en réalité tout dépend du scénario qui a été implémenté dans sa mémoire, des choix effectués par l'auteur.

Nous pensons que la recherche en didactique est un atout majeur pour l'analyse et la construction des séquences programmées dans le robot, afin que les objectifs visés soient atteints. De manière générale, dans la création d'environnements informatiques au service des apprentissages, dont les plus connus sont à ce jour les Serious Games éducatifs et autres logiciels d'aide aux élèves, les considérations didactiques doivent occuper une place centrale. Ne serait-il pas dommage de faire évoluer les élèves dans des environnements technologiques stimulants et créatifs, aux graphismes sophistiqués et à l'ergonomie soignée, si l'objectif de construction des savoirs n'est pas atteint ?

Pour terminer, nous pouvons évoquer ALIZ-E, un projet européen de recherche dans le domaine de l'éducation aux gestes thérapeutiques à l'aide de robots humanoïdes. Nous y retrouvons le robot NAO présent dans notre étude. Dans le cadre de ce projet, des séquences ont été programmées pour apprendre à des enfants diabétiques comment gérer leur maladie. Malgré le contact privilégié entre les enfants et le robot, un des atouts majeurs de leur motivation, les premiers résultats ont été plus mitigés que prévus. Un questionnement sur l'aspect didactique de l'apprentissage visé serait intéressant.

La recherche en didactique revêt aujourd'hui une importance cruciale dans les processus automatisés d'apprentissage, afin que ceux-ci ne passent pas à côté de ce pour quoi ils ont été conçus : la construction de savoirs.

Bibliographie

- ASSUDE, T. (1989), Racines carrées : conceptions et mises en situation d'élèves de quatrième et de troisième. *Petit x*, 20 (pp. 5-33).
- ASTOLFI, J. P. (1997). L'erreur, un outil pour enseigner, Éd. E.S.F.
- BACHELARD, G. (1996). La formation de l'esprit scientifique. Vrin. Paris.
- BALACHEFF, N. (1994). La transposition informatique. In Artigue, M. et al. (eds) *Vingt ans de didactique des mathématiques en France* (pp 364-370).
- BALACHEFF, N. (2002). Contribution à la réflexion sur la recherche sur les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. In Baron G.-L. et Bruillard E. (eds.) *Les technologies en éducation : Perspectives de recherche et questions vives* (pp 193-201). Paris : INRP – MSH - IUFM de Basse-Normandie.
- BALACHEFF, N. & MARGOLINAS, C. (2005), cK ϕ Modèle de connaissances pour le calcul de situations didactiques. In *Mercier A. & Margolinas C. (Ed.), Balises en Didactiques des Mathématiques*, p. 75 – 106. Grenoble : La Pensée Sauvage — Éditions.
- BELLEMAIN, F. (1992), Conception, réalisation et expérimentation d'un logiciel d'aide à l'enseignement de la géométrie : Cabri-géomètre. Thèse d'Université, LSD2-IMAG, Université Joseph Fourier. Grenoble.
- BESSOT, A. (2003). Une introduction à la théorie des situations didactiques. Les Cahiers Leibniz, 91.
- BROUSSEAU, G. (1986), Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. *Recherche en didactiques des mathématiques*, Vol. 7, n° 2, p. 33-115.
- BROUSSEAU, G. (1990). Le contrat didactique : le milieu. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, Vol. 9, n° 3, p. 309–336.
- BROUSSEAU, G. (1998). Théorie des situations didactiques. Grenoble : La Pensée sauvage.
- BROUSSEAU, G. (2000). Les erreurs des élèves en mathématiques. *Petit x*, 57 (pp. 5-30).
- BROUSSEAU, G. (2009). L'erreur en mathématiques du point de vue didactique. *Tangente Education*, 7 (pp. 4-7).
- BROUSSEAU, G. (2010). Introduction à l'ingénierie didactique, Esquisse d'un curriculum. <http://www.guy-brousseau.com> (consulté le 4 mars 2012 à 16h30).

- BROUSSEAU, G. et WARFIELD, V. (2002). Le cas de Gaël. Les Cahiers Leibniz, 55.
- BRUNER, J.S. (1983). Le développement de l'élève, savoir-faire, savoir dire. Paris : PUF.
- CHEVALLARD, Y. (1992). Intégration et viabilité des objets informatiques, le problème de l'ingénierie didactique. In B. Cornu (Ed.), *L'ordinateur pour enseigner les mathématiques* (pp. 183-203). Paris : PUF.
- CROSET, M-C. (2009). Modélisation des connaissances des élèves au sein d'un logiciel éducatif d'algèbre. Étude des erreurs stables inter-élèves et intra-élèves en termes de praxis-en-acte. Thèse de doctorat, Grenoble : Université Joseph Fourier.
- GONCALVES, C., CROSET, M-C, NEY, M., BALACHEFF, N., SCHWARTZ C., BOSSON, J-L. (2011). Authenticité d'un jeu sérieux : un modèle pour la conception et pour l'analyse. *Revue d'Intelligence Artificielle*, numéro spécial Serious Game.
- LEMOYNE, G., GIROUX, J., RENÉ DE COTRET, S., BROUILLET, F. (2005) Environnement informatique pour l'enseignement du calcul réfléchi : un travail orienté par la théorie des situations didactiques, In M.-H. Salin, P. Clanché et B. Sarrazy (éditeurs), *Sur la théorie des situations didactiques. Hommage à Guy Brousseau*, Grenoble: La Pensée Sauvage éditions, pp. 279-296.
- LIMA, I. (2006). De la modélisation de connaissances des élèves aux décisions didactiques des professeurs. Thèse de doctorat, Grenoble : Université Joseph Fourier.
- MARGOLINAS, C. (2005). La situation du professeur et les connaissances en jeu au cours de l'activité mathématique en classe. *Actes 2004 de la rencontre annuelle du groupe canadien d'étude en didactique des mathématiques*, CMESG/GCEDM, Edmonton.
- PERRIN-GLORIAN, M.-J. (2002). Didactique des mathématiques In Bressoux, P. et al. (Eds.) Les stratégies de l'enseignant en situation d'interaction. *Rapport de recherche pour Cognitive, Programme École et Sciences Cognitives*, Ministère de la Recherche.
- PIAGET J. (1975) L'équilibration des structures cognitives problème central du développement. PUF, Paris.
- SENSEVY G. (2001), « Théories de l'action et action du professeur », *Théories de l'action et éducation*, J.-M. Beaudouin & J. Friedrich, Bruxelles, de Boeck, pp.202-224.
- SOURY-LAVERGNE, S. (1998). Etayage et explication dans le préceptorat distant, le cas de Télécabri. Thèse de doctorat, Grenoble : Université Joseph Fourier.

- TCHOUNIKINE, P. (2003). Quelques éléments sur la conception et l'ingénierie des EIAH. In *Actes des deuxièmes assises nationales du GdR I3*.
- TCHOUNIKINE, P. (2002), Pour une ingénierie des Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain. *Revue I, information – interaction – intelligence*. 2(1).
- VERGNAUD, G. (1990). La Théorie des Champs Conceptuels, *Recherches en Didactique des Mathématiques*, 10/2.3 : 133-170.

ANNEXE 1 : Descriptif du robot NAO

Le robot humanoïde NAO

Descriptif technique :

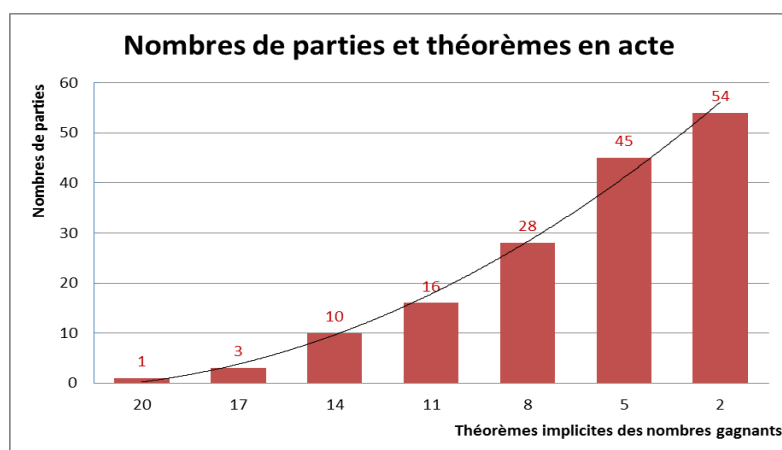
- 57 cm de hauteur. 25 degrés de liberté.
- 2 caméras, 4 micros, 1 sonar.
- 2 émetteurs/récepteurs IR. 1 centrale inertielle.
- 9 capteurs digitaux. 8 capteurs de pression.
- 2 haut-parleurs. 1 synthétiseur de parole.
- Ethernet. WIFI. Bluetooth.

Capacités :

- Puissantes possibilités de programmation (c++, Python).
- Reconnaissance vocale. Reconnaissance visuelle.
- Marche. Manipulation d'objets.

ANNEXE 2 : Statistiques de la course à 20 selon Brousseau

Le graphique et le tableau ci-dessous illustrent le lien entre le nombre de parties jouées et l'apparition des théorèmes implicites liés aux nombres gagnants.



Graphique élaboré à partir de données de G. Brousseau (1978)

	Nombre de parties nécessaires pour l'émergence du théorème						
Théorème implicite	20	17	14	11	8	5	2
Situation d'action	1	3	9	15*	26*	46	-
Situation de formulation après action	1	4	16	-	-	-	-
Situation de preuve	1	6	10	10	-	-	-
Institutionnalisation	1	4	9	10	10	10	10

* le théorème 11 apparut à la 15^e partie disparaît après la 30^{ème}, le théorème 8 ne se maintient que pendant une quinzaine de parties puis disparaît. Le théorème 5 apparaît à la 46^{ème} partie.

Tableau proposé par Brousseau (1998)

Le tableau ci-dessus permet de visualiser le « rendement » des différentes phases dans la production des théorèmes implicites. Nous constatons qu'il faut jouer un grand nombre de parties pour déterminer la stratégie optimale.